

VERSTÄRKUNG VON STAHLBETONPLATTEN DURCH ANGEKLEBTE LASCHEN  
AUS GLASFASERVERSTÄRKTEM KUNSTSTOFF

Forschungsbericht

von

F.S. Rostásy

E.-H. Ranisch

Gefördert mit Hilfe von Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen.

Bewilligt durch Erlaß des Nieders. Ministers für Wissenschaft und Kunst vom 12.12.1983 (Aktenzeichen: 2091 - BV 4e - 45/83).

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Versuchsplan
3. Herstellung der Platten
4. Messungen
5. Rechenwerte und Versuchsablauf
6. Bruchverhalten
7. Meßergebnisse
8. Zusammenfassung und Wertung

Literatur

Bildanlagen

## Bezeichnungen

### a) kleine Buchstaben

- b Plattenbreite
- $b_L$  gesamte Laschenbreite pro m
- $b_{L1}$  Breite einer Lasche
- c Betondeckung der Bewehrung
- d Plattendicke
- f Durchbiegung
- h statische Höhe
- k Verteilungsbeiwert nach /7/
- $l_v$  Verankerungslänge der Laschen, beginnend am Punkt A nach DIN 1045
- $t_L$  Laschendicke
- u als Index: Bruchzustand (ultimate)
- w Rißbreite
- x Abstand der Nulllinie vom Druckrand
- $z_s, z_L$  innerer Hebelarm der Bewehrung bzw. der Laschen

### b) große Buchstaben

- $A_s, A_L$  Querschnitt der Bewehrung bzw. der Laschen pro m Plattenbreite
- $E_s, E_L$  E-Modul der Bewehrung bzw. der Laschen
- F Belastung (Pressenkraft)
- $F_0$  Oberlast bei dynamischer Belastung
- $F_u$  Bruchlast
- $K_s, K_L$  Dehnsteifigkeit der Bewehrung bzw. der Laschen =  $A_s E_s$  bzw.  $A_L E_L$
- $M_s$  Gebrauchsmoment der unverstärkten Platte
- $M_{5\%0}$  (Norm) Moment, bei dem die rechnerischen Dehnungen der Bewehrung 5‰ betragen.  
Streckgrenzen und der Rechenwert der Betondruckfestigkeit  $\beta_R$  werden mit ihren Normwerten angesetzt.
- $M_{5\%0}$  (Ist) wie vor, jedoch mit den tatsächlichen Streckgrenzen und  $\beta_R = 0,85 \beta_W$  gerechnet.
- $M_u(\tau)$  Moment, bei dem die 1,75fachen Werte der zulässigen Schubspannung  $\tau$  rechnerisch erreicht wird.
- $M_{u, \text{Vers.}}$  Bruchmoment im Versuch

$Q_s, Q_L$  Querkraftanteile der Bewehrung bzw. der Laschen

$Q_{L1}$  Querkraftanteil einer Lasche

$R$  als Index: Rechenwert

$Z_L$  Zugkraft der Laschen

c) Griechische Buchstaben

$\beta_R$  Rechenwert der Betondruckfestigkeit

$\beta_s$  (Ist-) Streckgrenze der Bewehrung

$\epsilon_{sR}, \epsilon_{LR}$  Stahl- bzw. Laschendehnung im Riß

$\eta$  Verstärkungsgrad =  $K_L/K_s$

$\rho$  Verstärkungsfaktor =  $M_{5\%0}(\text{Norm})/1,75 M_s$  (Platte 0)

$\mu_s$  Bewehrungsgrad der unverstärkten Platten

$\tau_0$  Grundwert der Schubspannung nach DIN 1045

$\tau_1, \tau_2$  Schubspannung in Höhe der Nulllinie bzw. in Höhe der Bewehrung nach /7/

$\tau_K$  Spitzenwert der Verbundspannungen in der Klebschicht nach /9/

$\tau_{vm}$  mittlere Verbundspannung in der Klebschicht

## 1. Einleitung

Das Verstärken von Stahl- und Spannbetontraggliedern durch angeklebte Stahllaschen wurde zuerst in Frankreich und Japan Anfang der sechziger Jahre durchgeführt. In Deutschland hat sich diese Methode zur Sanierung der gerissenen Koppelfugen von durchlaufenden Spannbetonbrücken bewährt. Auch im Hochbau findet das Verfahren zunehmend Anwendung, seit einige Firmen eine bauaufsichtliche Zulassung dafür besitzen.

Das Schub- und Biegetragverhalten von laschenverstärkten Stahlbetonplatten haben die Autoren in einer vorausgegangenen Forschungsarbeit gleicher Förderung bearbeitet /1/. Das wesentliche Ergebnis dieser Arbeit war, daß derartige Platten hinsichtlich Trag- und Verformungsverhalten der konventionellen Stahlbetonbauweise gleichwertig sind.

Bei Stahllaschen, die frei der Witterung oder hoher Luftfeuchtigkeit ausgesetzt sind, stellt die Sicherung eines dauerhaften Korrosionsschutzes noch ein Problem dar. Insbesondere ist es nicht auszuschließen, daß unter ungünstigen Bedingungen die der Klebung zugewandte Laschenseite korrodiert, wodurch die Adhäsion langfristig geschwächt würde /2/, /3/, /4/. Auf jeden Fall müssen die Klebflächen der Stahllaschen entweder zum Zeitpunkt des Klebens metallisch blank (Reinheitsgrad Sa 3,0 nach DIN 54928) sein oder im metallisch blanken Zustand mit einem geeigneten Primer versehen werden. Beide Verfahren haben sich unter den Bedingungen der Baupraxis als problematisch und sehr aufwendig erwiesen.

Wie die Autoren in ihrer ebenfalls vom Land Niedersachsen geförderten Forschungsarbeit "Sanierung von Betontragwerken durch Ankleben von Faserverbundwerkstoffen" /5/ gezeigt haben, bieten Laschen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) hinsichtlich Langzeitverhalten und Vorbehandlungsaufwand bedeutende Vortei-

le. Das derzeit auf dem Markt befindliche Laschenmaterial besitzt die rund dreifache Zugfestigkeit von Baustahl ST 37.

Ein Nachteil der GFK-Laschen ist ihr im Vergleich zu Stahl niedriger E-Modul. Er beträgt je nach Glasgehalt 30 bis 40 GPa. Für die Anwendung folgt daraus dreierlei:

1. Die Querschnitte von GFK-Laschen müssen für den gleichen Verstärkungsgrad erheblich größer sein als die von Stahllaschen.
2. Die hohe Zugfestigkeit des GFK kann nicht ausgenutzt werden.
3. Bei der Bemessung der Laschen muß deren Dehnsteifigkeit einfließen. Dadurch wird der Bereich der bewährten Bemessungshilfen des Stahlbetonbaus verlassen.

Wegen dieser Besonderheiten war es das Ziel dieses Forschungsvorhabens, das Schub- und Biegetragverhalten des häufigsten Verstärkungselements Platte mit zusätzlich angeklebten GFK-Laschen zu untersuchen und Bemessungshilfen zu entwickeln.

Die Forschungsarbeit wurde in dankenswerter Weise durch den Niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kunst aus Mitteln des Zahlenlottos gefördert.

## 2. Versuchsplan

Die Versuche wurden an Einfeldplattenstreifen von 0,18 m Dicke und 1,00 bis 1,80 m Breite durchgeführt. Die Stützweite betrug 3,08 und 3,62 m. Die Belastung wurde über zwei symmetrische Linienlasten im Abstand von 1,32 m aufgebracht, so daß sich ein Momenten-Schub-Verhältnis von  $M/Qh = 5,5$  bzw.  $7,2$  ergab. Die Bewehrung der Platten bestand aus einer Betonstahlmatte K 884 aus BSt 500M ( $\mu_s = 0,55 \%$ ). Im unverstärkten Zustand beträgt das zulässige Moment  $M_s = 38 \text{ kNm}$ .

T a b e l l e 2.1 : Versuchsvariable der Plattenversuche

Platte Nr.	Platten- breite	$\frac{M}{Q \cdot h}$	Laschen- E-Modul	Laschenverstärkung Anzahl / Querschnitt	Laschen- abstand	Laschen- endverankerung	Verstärkungs- grad	Hauptein- flußgröße
-	m	-	GPa	- / mm <sup>2</sup>	cm	-	-	-
1	1,0	5,5	39	5 $\neq$ 10 x 100	20	eins. Bolzen	1,05	Laschen- E-Modul
2	1,0	5,5	29	5 $\neq$ 10 x 100	20	eins. Bolzen	0,78	
3	1,0	7,2	39	5 $\neq$ 10 x 100	20	ohne Bolzen	1,05	Verstär- kungsgrad
4	1,0	7,2	29	4 $\neq$ 10 x 100	25	wechsels.Bolzen	0,62	
5	1,0	7,2	39	2 $\neq$ 10 x 200	50	ohne Bolzen	0,84	Laschen- geometrie
6	1,0	7,2	39	2 $\neq$ 20 x 100	50	beids. Bolzen	0,84	
7	1,0	5,5	39	2 $\neq$ 20 x 100	50	beids.Bolzen	0,84	Bolzenver- ankerung
8	1,0	5,5	39	2 $\neq$ 20 x 100	50	ohne Bolzen	0,84	
9	1,8	5,5	39	2 $\neq$ 30 x 100	90	beids.Bolzen	0,70	Schubarm- länge
10	1,8	7,2	39	2 $\neq$ 30 x 100	90	beids.Bolzen	0,70	
10 S	1,8	7,2	210	2 $\neq$ 5 x 100	90	beids.Bolzen	0,63	-

Die Platten mit  $M/Qh = 5,5$  glichen denen, die früher mit Stahl-laschen untersucht worden waren /1/. Dort wurde auch das Trag-verhalten der unverstärkten und einer Platte, die mit 2 Beton-stahlmatten K 884 (Verdoppelung des Bewehrungsgrades) geprüft. Für die Platten mit verdoppeltem Bewehrungsgrad ( $2 \mu_s = 1,10 \%$ ) ist mit  $M/Qh = 5,5$  nach Rafla /6/ Schubbruch zu erwarten.

Bei der Laschenverstärkung wurden folgende Parameter variiert:

- a) Laschenmaterial:  
E-Modul
- b) Laschengeometrie:  
Breite  
Dicke  
Abstand
- c) Endverankerung der Laschen:  
mit Bolzen  
ohne Bolzen
- d) Verstärkungsgrad

Unter dem Verstärkungsgrad  $\eta$  wird hier das Verhältnis der Dehn-steifigkeit von Lasche zu Bewehrung verstanden:

$$\eta = \frac{A_L E_L}{A_S E_S}.$$

Als eine zusätzliche, aber unerwünschte Variable muß die Streck-grenze des Bewehrungsstahls aufgefaßt werden. Diese streute leider innerhalb einer Lieferung von 538 bis 630 MPa.

Insgesamt wurden 10 Platten geprüft. Da die Platte Nr. 10 nach dem Ablösen der GFK-Laschen noch keine breiten Risse besaß und der Mattenstahl kaum geflossen war, wurde diese Platte ein zweites Mal verstärkt, nun aber mit Stahllaschen, die eine ähn-



lich große Dehnsteifigkeit wie die vorherigen GKF-Laschen hatten. Dieser Versuch erhielt die Nummer 10S.

Die Tabelle 2.1 zeigt die Versuchsp Parameter, Bild 2.1 die Plattenquerschnitte.

Die paarweise hergestellten und geprüften Platten unterscheiden sich stets in einer wesentlichen Einflußgröße, der Haupteinflußgröße nach Tabelle 2.1, deren Einfluß in einem direkten Vergleich der Meßwerte des Plattenpaares sichtbar wird.

### 3. Herstellung der Platten

Die wichtigsten Materialeigenschaften von Beton und Bewehrungsstahl sind in den Tabellen 3.1 und 3.2 zusammengestellt. Die Platten wurden paarweise betoniert, nach siebentägiger feuchter Nachbehandlung aus der Schalung gehoben und anschließend senkrecht aufgestellt. In einem Betonalter von mindestens 3 Wochen wurden die Klebflächen für die Laschen auf den Bodenflächen der Platten mit einem Vacuumstrahlgerät gestrahlt, bis der Zuschlag > 8 mm sichtbar war. Als Strahlmittel wurde Quarzsand 0,5/1,0 mm verwendet.

In einem Betonalter von mindestens vier Wochen wurden die Platten mit obenliegender Zugzone in die Belastungseinrichtung eingebaut (Bild 3.1). Die Betondruckfestigkeit wurde jeweils zu Versuchsbeginn und Versuchsende an drei Erhärtungswürfeln mit 15 cm Kantenlänge geprüft. Da die gewählte Betonrezeptur nach 28 Tagen nur noch eine geringe Nacherhärtung besaß, betrug die Druckfestigkeit trotz unterschiedlicher Belastungsalter 31 bis 36 N/mm<sup>2</sup>.

Nach einem Anreißen der unverstärkten Platten durch 30maliges Aufbringen der zulässigen Gebrauchslast wurden die Laschen aufgeklebt. Wie bei den Versuchen in /1/, /2/, /4/ und /5/ wurde

der vom Institut für Bautechnik zugelassene Klebstoff XB 3074 Normal von Ciba-Geigy verwendet. Die Kennwerte des Klebers sind in der Tabelle 3.3 wiedergegeben.

Die zwei Komponenten des Klebers wurden mit einer Handbohrmaschine mit Rührpropeller mit 400 U/Min. 3 Minuten lang vermischt. Dann wurde der Kleber auf den Beton aufgetragen. Dadurch wurden bewußt ungünstigere Bedingungen für die Verbundfestigkeit eingestellt. Nach Untersuchungen von Ladner /2/ ergeben sich, insbesondere bei Ausnutzung der offenen Zeit des Klebers, geringfügig höhere Verbundfestigkeiten, wenn der Kleber nur auf die Laschen und nicht auf den Beton aufgetragen wird. Der aufgetragene Klebstoff kann unter ungünstigen Bedingungen (hohe Luftfeuchtigkeit, Staub etc.) an der freien Oberfläche eine Art Haut bilden. Diese Hautbildung kann durch die höhere Makrorauigkeit des Betons, wenn die Lasche mit aufgebrachtem Kleber gegen den Beton gepreßt wird, eher unschädlich gemacht werden als durch die glatte Klebflächen der Laschen.

Es wurden GFK-Laschen von zwei Herstellern, nämlich: Grillo-Werke AG, Voerde (G-Laschen) und Röchling Haren KG, Haren/Ems (R-Laschen), verwendet. Bei den G-Laschen handelt es sich um stranggepreßte Profile von 10 x 100 mm<sup>2</sup> Querschnitt mit 55 Gew.% unidirektionalem Glasgehalt (Spinnroving) in UP-Harz. Bei den R-Laschen handelt es sich um Flachprofile von 10 mm Dicke, die aus großformatig gepreßten Platten herausgesägt werden. Der Glasgehalt beträgt 70 Gew.% unidirektionales Rovingewebe, davon sind 95 % in Längsrichtung angeordnet. Die Matrix besteht in den äußeren 2 mm aus besonders hochwertigem cycloaliphatischem EP-Harz und im Inneren aus EP-Harz. Die Laschen sind werkseitig mit einer Bandschleifmaschine angeschliffen worden. Unmittelbar vor dem Kleben sind die Laschen mit einem in Aceton getränkten Lappen abgewischt worden. Die Materialkennwerte der Laschen sind in der Tabelle 3.4 zusammengestellt (s. hierzu auch /5/). Der wichtigste Unterschied der beiden Laschenfabrikate besteht im E-Modul. Für den höheren E-Modul der R-Laschen

ist auch ein deutlich höherer Preis zu zahlen. Alle Laschen sind im Zuge der Plattenversuche mehrfach verwendet worden. Dazu wurde die nach dem Versuch anhaftende Klebschicht abgeschliffen. Eine versuchsbedingte Veränderung des Laschenmaterials ist wegen der dabei auftretenden niedrigen Spannungen nicht anzunehmen.

Bei den Platten 7 bis 10 wurden zunächst 2 bzw. 3 Einzellaschen lamellenartig miteinander verklebt. Nach dem Aushärten dieser Klebung wurden dann diese "Laschenpakete" von 20 bzw. 30 mm Dicke auf den Beton geklebt. Derartige Laschendicken würden werksmäßig auch üblicherweise durch Verkleben hergestellt werden.

Tabelle 3.1: Zusammensetzung und Eigenschaften des Betons

Zement PZ35F "Teutonia"	285 kg/m <sup>3</sup>
W/Z	0,85
Sand 0/1 (Abbesbüttel)	192 kg/m <sup>3</sup>
Sand 0/2 (Vienenburg)	863 kg/m <sup>3</sup>
Kies 2/8 (Vienenburg)	481 kg/m <sup>3</sup>
Kies 8/16 (Vienenburg)	288 kg/m <sup>3</sup>
Kies 16/32 (Wipshausen)	96 kg/m <sup>3</sup>
Frischbetonrohddichte (soll)	2340 kg/m <sup>3</sup>
Ausbreitmaß	38 - 40 cm
Druckfestigkeit $\beta_{w28}$ (i.M.)	32 N/mm <sup>2</sup>
E-Modul	23 kN/mm <sup>2</sup>
Haftzugfestigkeit (gestrahlte Flächen)	1,9 N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 3.2: Eigenschaften des Betonstahls BSt 500M (Mittelwerte)

Nenn Durchmesser	7,5 mm
Querschnitt (ist)	836 mm <sup>2</sup> /m
Streckgrenze $R_{p0,2}$	569 N/mm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit $R_m$	615 N/mm <sup>2</sup>
Bruchdehnung	8,6 %
Knotenscherfestigkeit	43 %

Tabelle 3.3: Kennwerte des Klebers XB 3074 Normal

Mischungsverhältnis Harz/Härter	100/59
Relaxationstemperatur	52 ± 2 °C
Glühverlust DIN 53 395	53,4 %
Dichte DIN 53 479	1,51 g/cm <sup>3</sup>
Viskosität DIN 53 019	75 Pas
Zugfestigkeit an Stahlrondellen Ø 25 mm:	
7 Tage bei 30 °C	26 N/mm <sup>2</sup>
7 Tage bei 15 °C	22 N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 3.4: Eigenschaften der GFK-Laschen nach /5/

	G-Lasche	R-Lasche
Laminierharz	UP	EP
Glasgehalt DIN 53 395 Gew.-%	55	70
Rohdichte DIN 53 479 g/cm <sup>3</sup>	1,80	1,85
Zugfestigkeit DIN 53 455 MPa	520	700
E-Modul DIN 7 735 MPa	27.000	35.000
E-Modul (Dehnversuch) MPa	29.000	39.000

Ein Teil der Laschen (s. Versuchsplan Tabelle 2.1 und die Meßstellen Pläne 4.1 bis 4.11) wurden an den Enden zusätzlich durch Gewindebolzen verankert. Verwendet wurden rohe Schrauben M20 der Güte 8G nach DIN 267.

Die Schrauben wurden durch Bohrlöcher  $\varnothing$  25 mm in den Laschen und im Beton gesteckt. Die Bohrungen in den Laschen befanden sich 50 mm vor dem Ende. Auf beiden Seiten der Bolzen wurden stählerne Ankerplatten 10 x 100 x 100 mm<sup>3</sup> angeordnet. Auf die zur Lasche zugewandte Platte wurde Klebstoff aufgetragen.

Unmittelbar nach dem Anpressen der Laschen wurden auch die Gewindebolzen vorgespannt. Mit einem Drehmomentschlüssel wurde an der Mutter ein Moment von 6,0 kNm aufgebracht, welches zu einer Bolzendehnung von rd. 1,7 mm/m entsprechend 56 % der zulässigen Spannung führte.

#### 4. Messungen

##### 4.1 Durchbiegung

Die Durchbiegung wurde mit 3 induktiven Wegaufnehmern W50 in der Längsachse gemessen. Bei den 1,80 m breiten Platten Nr. 9 und 10 wurden zusätzliche Wegaufnehmer an den Plattenrändern angeordnet. Die Meßwerte wurden laststufenweise registriert.

Zusätzlich wurden die Kolbenwege mit Wegaufnehmern W200 gemessen und zeitabhängig mit einem Linienschreiber registriert.

##### 4.2 Betondehnungen

Die Betondehnungen wurden in Höhe der Bewehrung und in 2 cm Abstand vom Druckrand mit Hilfe von Meßketten, bestehend aus je 15 Meßstellen, für einen Setzdehnungsmesser mit einer Meßbasislänge von 200 mm gemessen. Die Meßwerte wurden laststufenweise manuell elektrisch aufgenommen und auf Magnetband gespeichert.

Aus Sicherheitsgründen mußten diese Messungen jedoch deutlich vor Erreichen der Bruchlast eingestellt werden.

#### 4.3 Stahldehnungen

Die Dehnungen der Längsbewehrung wurden in Plattenmitte an einem vorgekerbten Riß mit Dehnmeßstreifen (DMS) an jedem zweiten Doppelstab der Betonstahlmatte K884 gemessen. Die Meßwerte wurden laststufenweise aufgenommen und auf Magnetband gespeichert.

#### 4.4 Laschendehnungen

Die Dehnungen der aufgeklebten GFK-Laschen wurden über dem vorgekerbten Riß mit seitlich angeklebten DMS gemessen. Zusätzlich wurden im Verankerungsbereich jeweils einer Lasche über die Risse der Vorbelastung DMS auf die Lasche geklebt und laststufenweise gemessen.

Weiter wurden die mittleren Laschendehnungen mit einer Kette aus Setzdehnungsmeßstellen, die sich über die ganze Laschenlänge erstreckte, manuell elektrisch gemessen. Die Lage aller Meßstellen zeigen die Bilder 4.1 bis 4.11.

#### 4.5 Rißbreiten

Die Breite des ersten vorgekerbten Biegerisses in Plattenmitte wurde mit 2 induktiven Wegaufnehmern W2 laststufenweise gemessen. Die hier gesammelten Meßwerte entsprachen stets dem Größtwert max. w.

Im Bereich des konstanten Moments zwischen den Auflagern wurden die Rißbreiten auf der Plattenoberseite an zwei Meßlinien gemessen. Die eine Meßlinie verlief in Plattenmitte und gibt somit die Rißbreite im halben Laschenabstand wieder.

Auf der anderen Linie wurde die Rißbreite im 5 cm Abstand von der ersten vorderen Lasche gemessen.

Zur Rißbreitenmessung wurde eine Fernsehkamera mit Makroobjektiv eingesetzt, womit die Risse in 60facher Vergrößerung auf einem Monitor erscheinen und dort gemessen werden.

#### 4.5 Verschiebungsmessungen

An den Enden der Laschen wurden induktive Wegaufnehmer W2 TK angesetzt, um dort die Verschiebungen der Laschen infolge der Verformungen der Klebschicht zu messen (s. Bild 4.12). Die Meßwertregistrierung erfolgte kontinuierlich mit einem Mehrkanallinienschreiber.

### 5. Rechenwerte und Versuchsablauf

#### 5.1 Rechnerische Ermittlung der Beanspruchungen

##### 5.1.1 Biegung

Die rechnerischen Biegebruchmomente wurden mit dem in /8/ beschriebenen Programm sowohl mit den Festigkeitswerten nach DIN 1045 als auch mit den tatsächlichen Festigkeiten berechnet. Bei der Berechnung mit Festigkeiten nach DIN 1045 wurde für die Spannungs-Dehnungslinie des Betons das Parabel-Rechteck-Diagramm nach DIN 1045 mit  $\beta_R = 0,7 \cdot 25 = 17,5 \text{ N/mm}^2$  angesetzt. Für den Betonstahl wurde die bilineare Spannungs-Dehnungslinie nach DIN 1045 mit der Normstreckgrenze für BSt 500 M von  $\beta_S = 500 \text{ N/mm}^2$  benutzt. Für die Laschen wurden lineare Spannungs-Dehnungslinien mit Steigungen, die den im Dehnversuch ermittelten E-Moduli entsprechen, verwendet. Diese Arbeitslinien sind im Bild 5.1 dargestellt.

Nach DIN 1045 entspricht das rechnerische Biegebruchmoment dem Moment, bei dem entweder die Stahldehnung  $\epsilon_S$  (im unverstärkten Zustand) bzw. in Analogie dazu die Laschendehnung  $\epsilon_L$  (im verstärkten Zustand) 5 ‰ oder die Betondehnung  $\epsilon_B$  in der Druckzone -3,5 ‰ erreicht.

In den Zulassungen für Laschenverstärkungen /7/ ist das rechnerische Bruchmoment für eine maximale Laschendehnung von  $\epsilon_L = 2 \text{ ‰}$  zu bestimmen.

T a b e l l e 5.1 : Belastungskenngrößen

Platte-Nr.	Einheit	0 <sup>**</sup> )	1	2	7	8	9	3	4	5	6	10	10 S
M/Q h	-	....	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	7,3	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
Laschenzahl	-	ohne	5	5	2	2	2	5	4	2	2	2	2
Laschenquer- schnitt	cm <sup>2</sup>	-	1x10	1x10	2x10	2x10	3x10	1x10	1x10	1x20	2x10	3x10	0,5x10
Verstärkungs- grad	-	-	1,1	0,78	0,84	0,84	0,70	1,1	0,62	0,84	0,84	0,70	0,6
M <sub>50/100</sub> (Norm)	kN m/m	66	176*)	161*)	172	172	167	176	151	165	172	167	187
Verstärkungs- faktor $\mu$	-	1	2,7	2,4	2,6	2,6	2,5	2,7	2,3	2,5	2,7	2,5	1,3
M <sub>20/40</sub> (Norm)	kN m/m	54	103	89	92	92	84	103	80	92	92	84	87
Gebrauchslast	kN/m	43	67	58	60	60	55	51	40	46	46	42	33
Oberlast im Versuch F <sub>0</sub>	kN/m	50	80	80	80	80	72	60	50	60	60	60	60
$\tau_1$ (F <sub>0</sub> )	MPa	0,27	0,52	0,52	0,65	0,65	0,84	0,39	0,33	0,44	0,50	0,70	0,68
$\tau_2$ (F <sub>0</sub> )	MPa	-	0,77	0,73	1,28	1,28	1,93	0,58	0,50	0,64	1,05	1,61	1,53
M <sub>20/40</sub> (ist)	kNm/m	48	107	93	97	97	87	107	83	97	97	87	60
M <sub>50/100</sub> (ist)	kNm/m	78	222	190	197	197	189	220	162	195	195	189	105
M <sub>u</sub> ( $\tau_1$ )	kNm/m	129	125	127	127	127	170	163	160	147	182	92	82
M <sub>u</sub> ( $\tau_2$ )	kNm/m	-	151	157	72	72	55	197	205	177	95	71	65
M <sub>u</sub> ( $\tau_K$ )	kNm/m	-	170	177	110	110	81	186	159	165	130	97	92
M <sub>u</sub> Vers.	kNm/m	77	144	128	123	97	108	179	141	132	108	92	101

\*) Betondruckbruch    \*\*) nach /1/, Vergleichsplatte



Diese beiden Momente sind mit  $M_{5\ 0/00}$  (Norm) bzw.  $M_{2\ 0/00}$  (Norm) bezeichnet und in der Tabelle 5.1 angegeben. Der dort ebenfalls genannte Verstärkungsfaktor  $\rho$  stellt das Verhältnis von  $M_{5\ 0/00}$  der verstärkten Platten zu  $M_{5\ 0/00}$  der unverstärkten Platte 0 (= 66 kNm/m) dar:

$$\rho = \frac{M_{5\ \%} (N.V)}{M_{5\ \%} (N.O)}$$

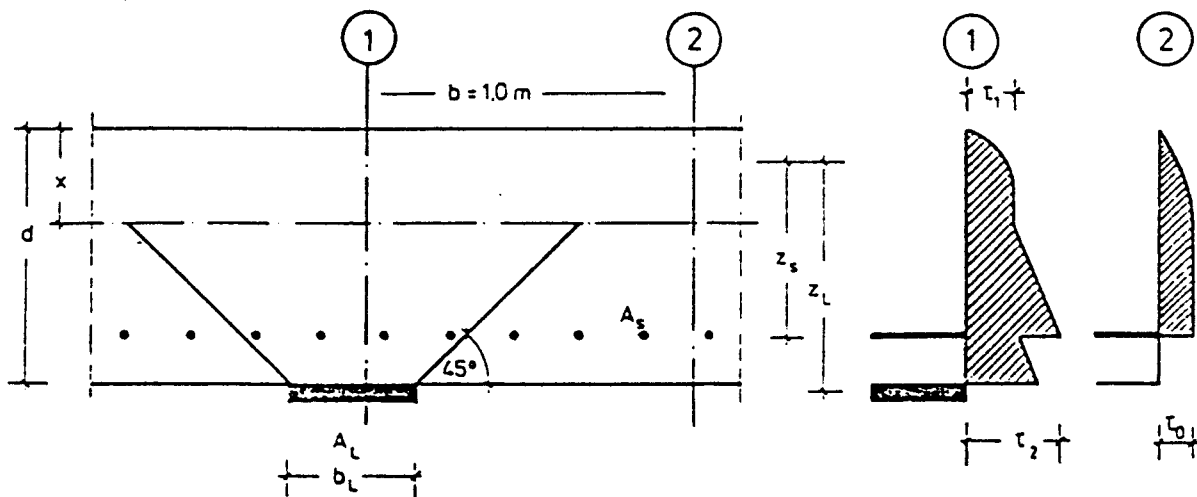
Das rechnerische Gebrauchsmoment definiert die Zulassung /7/ für laschenverstärkte Platten zu:  $M_{2\ 0/00}$  (Norm):1,75.

In der Tabelle 5.1 sind weiter die rechnerischen Bruchmomente bei Ansatz der tatsächlichen Materialkennwerte  $M_{2\ 0/00}$  (Ist) und  $M_{5\ 0/00}$  (Ist) angegeben. Für deren Berechnung wurde  $\beta_R$  zu 0,85  $\beta_{Wm}$  (zu Versuchsbeginn) und  $\beta_S$  mit der tatsächlichen Streckgrenze des Mattenstahls (s. Tabelle 6.1) angesetzt.

#### 5.1.2 Schub

Nach der Zulassung für stahllaschenverstärkte Betonbauteile /7/ sind die Schubspannungen in Höhe der Nulllinie und in Höhe der Bewehrung nachzuweisen. Dabei gelten folgende Annahmen:

- a) Die gesamte Querkraft  $Q$  verteilt sich auf die Bewehrung und die Laschen im Verhältnis von deren Querschnittsflächen.
- b) Für die Berechnung der Schubspannungen infolge des Querkraftanteils der Laschen darf von den Laschenrändern eine Ausbreitung unter  $45^\circ$  bis zur Nulllinie unterstellt werden.



Bei der Verwendung von GFK-Laschen muß anstelle der Aufteilung der Querkraft im Verhältnis der Flächen die Aufteilung im Verhältnis der Dehnsteifigkeiten treten:

$$Q_L = A_L \frac{E_L}{E_L + A_s E_s} Q$$

Für die Rechenwerte der Schubspannungen  $\tau_0$  nach DIN 1045 im Gebrauchszustand werden die höhenabhängigen Größen  $\tau_1$  (in Höhe der Nulllinie) und  $\tau_2$  (in Höhe der Bewehrung) definiert. Für sie gilt:

$$\tau_0 = \frac{Q_s}{b \cdot z_s} \leq 0,35 \text{ N/mm}^2 = \tau_{011} \text{ (n.DIN 1045, Tab.13, B 25)}$$

$$\tau_1 = \frac{Q_L}{(b_L + 2(d-x))z_L} + \frac{Q_s}{b \cdot z_s} \leq 0,51 \text{ N/mm}^2 \text{ nach /7/ für B 25 im Gebrauchszustand}$$

$$\tau_2 = \frac{Q_L}{b_L \cdot z_L} + \frac{Q_s}{b \cdot z_s} \leq 0,91 \text{ N/mm}^2 \text{ nach /7/ für B 25 im Gebrauchszustand}$$

Bei Ausnutzung der 1,75fachen zulässigen Schubspannungen  $\tau_1$  und  $\tau_2$  ergeben sich die rechnerischen Schubbruchmomente  $M_u(\tau_1)$  und  $M_u(\tau_2)$ , die ebenfalls in der Tabelle 5.1 angegeben sind.

### 5.1.3 Kleverbund

Eine Rechenmethode zur Abschätzung der Laschenzugkräfte, die zu einem Verbundbruch in der Klebfuge führen, ist in /9/ für Stahlbetonzugglieder hergeleitet worden. Dem Rechenverfahren liegt ein aus Versuchsbeobachtungen abgeleitetes bilineares Kraft-Verschiebungsdiagramm zugrunde. Dabei wird das Verhalten der Klebschicht als ideal-elastisch und das des darunterliegenden Betons als plastisch-entfestigend angenommen. Als Bruchkriterium wurde das Überschreiten einer Grenzverschiebung auf der Lasteintragsseite der Lasche eingeführt (Zugtrennriß). Rechenverfahren und Bruchkriterium wurden durch zahlreiche Versuche /9/ verifiziert. Das Kleverbundversagen bei laschenverstärkten Stahlbetonzuggliedern beginnt stets an der Stelle der größten Laschenzugkraft, also am lastseitigen Beginn der Verankerungslänge, ungeachtet der Existenz weiterer Trennrisse innerhalb der Verankerungslänge oder an deren lastfernem Ende.

Das o.g. Rechenverfahren wurde in vereinfachter Form zur Berechnung der erforderlichen Verankerungslänge der Laschen von Biegetraggliedern in die Zulassung /7/ übernommen. Als Bruchkriterium gilt hier das Überschreiten einer Grenzverschiebung an einem Riß in der Nähe des Punktes "A" nach DIN 1045, Bild 22 (siehe Skizze). Auch hier zeigten zahlreiche Versuche an Platten und Balken, daß das Kleverbundversagen an jener höchstbeanspruchten Stelle der Lasche einsetzt, an der außerdem eine hohe Querkraft wirkt. Nach der Theorie /9/ ist die Verbundspannungsverteilung in der Klebschicht durch einen Spitzenwert  $\tau_k$  gekennzeichnet, der nicht von der Last sondern im wesentlichen nur von der Zugfestigkeit des Betons abhängt. Die erforderliche Verankerungslänge läßt sich nach /7/ für den rechnerischen Bruchzustand wie folgt angeben:

$$\text{erf } l_v = \frac{Z_{Lu}^2}{b_L^2 \cdot t_L \cdot k \cdot \tau_k}$$

Hierin bedeuten:

$Z_{Lu}$  Laschenzugkraft im rechn. Bruchzustand  
mit  $\epsilon_L \leq 2 \text{ ‰}$



Während des Laschenklebens waren die Platten mit einem Moment von  $0,1 M_s$  belastet. Der Anpreßdruck für die Klebung wurde mit Schraubzwingen für 24 Stunden aufgebracht.

Die Prüfung der verstärkten Platten begann sieben Tage nach dem Kleben der Laschen. Vor Lastaufbringung wurden alle elektrisch aufzunehmenden Meßwerte erneut auf Null abgeglichen.

Zuerst wurde die Last in Stufen von 10 kN je Presse gesteigert, bis die zulässige Spannung in der Bewehrung von  $500:1,75 = 286$  MPa erreicht war. Diese Last wurde dann zur Oberlast  $F_0$  einer dynamischen Beanspruchung über 100.000 Lastwechsel mit einer Frequenz von 0,5 Hz. Die Unterlasten betrugen 50% der Oberlasten. Diese Oberlasten betrugen das 1,2- bis 1,4fache der Gebrauchslasten für laschenverstärkte Platten nach /7/.

Während der dynamischen Belastungsphase wurden nach 1, 10, 100, 1.000, 10.000 und 100.000 Lastwechseln Messungen unter Oberlast durchgeführt. Nach den 100.000 Lastwechseln wurde entlastet und die Belastungseinrichtung für den Bruchversuch von Kraftregelung auf Wegregelung umgestellt. Anschließend wurde die Oberlast erneut angefahren. Dann wurde zunächst in Stufen von rd. 10 kN die Belastung so lange gesteigert, wie die Kraft-Verformungslinie annähernd linear verlief und der Kraftabfall während der einzelnen Messungen klein blieb.

In Bruchnähe schließlich bei zunehmender Krümmung der Kraft-Verformungslinie wurde der Kolbenweg von Messung zu Messung nur noch millimeterweise bis zum Bruch gesteigert. In diesem Belastungsabschnitt wurden nur noch automatisch ablaufende Messungen durchgeführt, die nur wenige Sekunden dauerten.

Der Bruch erfolgte stets durch das Ablösen einer oder mehrerer Laschen und war mit einem schlagartigen Lastabfall verbunden.

Bei der Platte 2 lösten sich zuerst nur die Laschen am rechten Kragarm. Durch einen Umbau der Belastungseinrichtung wurde in einem zweiten Bruchversuch nur der linke Kragarm belastet.

Platte 10 wurde nach der Prüfung mit GFK-Laschen noch einer Prüfung mit Stahllaschen ähnlicher Dehnsteifigkeit unterzogen (Platte 10 S).

## 6. Bruchverhalten der Platten

### 6.1 Allgemeines

Mit Stahlbetonbauteilen mit aufgeklebten Stahllaschen, die als Biegezugbewehrung wirken, sind in verschiedenen Ländern zahlreiche Versuche durchgeführt worden. In aller Regel tritt bei derartigen Versuchen der Bruch durch ein Versagen des Klebverbunds ein /9/. Eine Ausnahme stellt der Schubbruch außerhalb der Laschenverstärkung dar, wie er bei hochbewehrten Platten in /1/ beobachtet wurde. Bei Verwendung von geeigneten Klebstoffen (kalthärtende, gefüllte Epoxidharze) und sachgerecht ausgeführter Klebung verläuft die Bruchfuge parallel zur Klebschicht im Beton in einigen Millimetern Tiefe. Je nach Zusammensetzung und Festigkeit des Betons werden dabei mehr oder weniger Zuschlagkörner abgeschert. Bei diesen Plattenversuchen mit GFK-Laschen trat stets vollständiger und besonders tiefer Betonbruch ein, was auf eine besonders gute Verbundqualität schließen läßt.

Vor dem Erreichen des endgültigen Verbundbruchs wird häufig bei hohen Laschenzugkräften beiderseits von Rissen ein örtlich begrenztes Verbundversagen mit kammartigen Rissen in der Klebschicht beobachtet. Beim endgültigen Bruch versagt jedoch in aller Regel der Verbund im Bereich eines Laschenendes, also im Verankerungsbereich. Dabei kann bei Verwendung von Stahllaschen im Bereich des Maximalmoments zuvor durchaus die Steckgrenze des Laschenstahls erreicht oder überschritten worden sein. Mittlere Laschendehnungen von mehr als 2 mm/m sind bei Laschen aus St 37 jedoch nur selten beobachtet worden.

Der Verbundbruch im Verankerungsbereich einer Lasche erfolgt schlagartig. Er beginnt stets an einem Biege- oder Biegeschubriß in der Nähe des rechnerischen Anfangspunktes A der Lasche nach DIN 1045, Ausgabe 1978, Bild 22. Bei Platten, die mit mehreren Laschen verstärkt sind, lösen sich die Laschenenden nacheinander innerhalb sehr kurzer Zeit.

Laschenverstärkte Platten weisen vor dem Bruch eine starke Durchbiegung auf, und die Laschen sind entsprechend stark gebogen. Durch das Bestreben, den ursprünglich geraden Zustand wieder einzunehmen, federn die Laschenenden beim Verbundbruch vom Beton weg. Das führt gelegentlich dazu, daß sich die Laschen in der Folge auf halber bis ganzer Länge vom Beton lösen.

Bei kraftgesteuerten Bruchversuchen können Balken und Platten nach dem Verbundbruch der Laschen durch anschließendes Reißen der Betonstahlbewehrung oder durch Schubbruch vollständig zerstört werden. Bei Wegsteuerung mit trägheitsarmen Regelementen stellen sich nach dem Verbundbruch durch ausgeprägtes Fließen des Betonstahls mehrere Millimeter breite Risse ein.

Die gemessenen und rechnerischen Bruchmomente und die dazugehörigen, gemessenen Beanspruchungsgrößen Durchbiegung, maximale Stahl- und Laschenspannung im RiB, maximale Laschen-dehnung, mittlere Verbundspannung und maximale RiBbreite, sind in der Tabelle 6.1 wiedergegeben. Die angegebene Spannung ist der Maximalwert gleichwertiger Meßstellen. Die mittlere Verbundspannung  $\tau_{vm}$  ist nach folgender Formel berechnet:

$$\tau_{vm} = \frac{\max \epsilon_L \cdot E_L A_L}{I_v b_L}$$

In der Tabelle 5.1 waren die rechnerischen Bruchmomente für die Ausnutzung von 5% Laschendehnung und für die Ausnutzung der Schub- und Verbundspannungen angegeben worden. In der Tabelle 6.1 zeigt die Zeile  $M_{uy}/M_{uR}$  das Verhältnis von Bruchmoment im Versuch zum kleinsten rechnerischen Bruchmoment aus Tabelle 5.1. Diese Verhältniswerte streuen stark von 0,89 bis 1,96. Mit den bekannten Rechenverfahren ist also eine hinreichend zuverlässige Abschätzung der Bruchlast nicht möglich. Insbesondere erscheinen die zulässigen Spannungen  $\tau_1$  und  $\tau_2$  der Zulassung als zu niedrig angesetzt.

Die Verhältniswerte  $M_{uy}/M_u$  ( $\tau_k$ ) streuen weniger stark, sind jedoch überwiegend kleiner als 1. Das bedeutet, daß die Berechnung der Verankerungslängen nach dem Verfahren der Zulassung für GFK-Laschen nicht auf der sicheren Seite liegt. Eine Verbesserung des Bemessungsverfahrens ist aufgrund der vorliegenden Versuchsergebnisse noch nicht möglich und erfordert weitere Forschungen.

Beim Vergleich der Bruchmomente müssen auch die unterschiedlich hohen Streckgrenzen der Bewehrung und die Vorbelastung berücksichtigt werden. Zwischen der Stahlspannung, Laschen- spannung und mittlerer Verbundspannung und dem Bruchmoment ist kein eindeutiger Zusammenhang zu erkennen. Eine grundsätzliche Begrenzung der Laschendehnungen im rechnerischen Bruchzustand auf 2 mm/m, wie die Bemessungsregeln der Zulassungsbescheide /7/ vorschreiben, erscheint für GFK-Laschen nicht sinnvoll.

## 6.2 Wirkung von Verankerungselementen

Als zusätzliche Verankerungselemente für die Laschenenden kommen Dübel, Ankerstangen und Gewindebolzen mit Mutter und Ankerplatte in Frage. Je nach ihrer Anordnung werden sie entweder vorwiegend auf Abscheren oder auf Zug beansprucht. Einen Überblick über verschiedene Systeme enthält die Zulassung /7/.



Laschenende angeordnet. Eine Erfassung der dadurch bedingten, halbseitigen Tragfähigkeitssteigerung ist jedoch nur bei Platte 2 gelungen. Bei den anderen Platten führte der erste Verbundbruch am unverbolzten Ende zu einem durch Abfedern der Laschen (s. unter 6.1) so weitgehenden Ablösen der Laschen, daß eine erneute Belastung der verbolzten Kragarme nicht mehr möglich war.

Ab Platte 5 wurden daher Bolzen beidseitig oder gar nicht angeordnet.

Bei diesen Platten hatten die Bolzen einen deutlichen Einfluß auf das Bruchverhalten und z.T. auch auf die Bruchlast (s. besonders Platte 7 u. 8). Bei den hochverstärkten, kurzen Platten (besonders deutlich bei Platte 2) wurde die Schubtragfähigkeit verbessert. Bei den langen Platten trat der Verbundbruch an den verbolzten Laschenenden im Vergleich zu den unverbolzten zwar nur geringfügig später ein, führte dann aber nicht gleich zum vollständigen Versagen der Platte. Auch an den verbolzten Laschenenden schlug der Verbundbruch stets sichtbar bis zum Laschenende durch. Danach wirkten aber in der rauhen Bruchfuge durch die hohe Querpressung verstärkte Reibkräfte, die i. d. R. noch eine weitere Laststeigerung erlaubten. Dabei nahm die Durchbiegung der Platte allerdings beschleunigt zu.

### 6.3 Bruchverhalten der einzelnen Platten

#### 6.3.1 Platte 1

Bei einer Last von 166 kN bildete sich auf der Bolzenseite ein Schubriß, der auf das Auflager zulief. Im selben Augenblick trat bei den 5 Laschen nahezu gleichzeitig Verbundbruch ein (s. Bild 6.1). Die Verbundbruchfuge erstreckte sich bei allen Laschen vom Schubriß bis zum Laschenende. Währenddessen war die Last auf 110 kN abgefallen.

Bei erneuter Laststeigerung trat kurz vor dem Erreichen der ersten Bruchlast von 166 kN Verbundbruch bei den Laschen auf der bolzenfreien Seite ein. Dabei federten die Laschen kurz nacheinander hoch und lösten sich dabei auf ganzer Länge vom Beton, so daß der ursprüngliche Beginn der Verbundbruchzone nicht festzustellen war.

Kurz vor dem Bruch wurden bereichsweise, besonders in der Nähe von Rissen an der Laschenoberseite Querrisse in der Harzmatrix beobachtet (Bild 6.2).

#### 6.3.2 Platte 2

Bei einer Last von 146 kN trat hinter den unverbolzten Laschen ohne jede Ankündigung Schubbruch ein (Bild 6.3). Ein ähnliches Bruchbild wurde bei den Platten mit Stahllaschen /1/ beobachtet.

Nach einem Umbau der Belastungseinrichtung wurde nun in einem zweiten Bruchversuch nur der Kragarm mit den verbolzten Laschenenden belastet. Bei einer Last von 189 kN bildete sich, unbeeinflusst von den bereits vorhandenen Biegerissen, ein auffällig breiter Schubriß, der auf das Auflager zulief. Wenige Augenblicke später trat mit dem Aufreißen des Verbundes aller Laschen von diesem Schubriß aus der Plattenbruch ein (Bild 6.4).

#### 6.3.3 Platte 3

Bei einer Last von 156 kN löste sich die Lasche Nr. 5 mit lautem Knall im Verankerungsbereich vom Beton und federte dort hoch, wobei sie sich auf ganzer Länge vom Beton löste. Dabei fiel die Last (bei festgehaltener Durchbiegung) auf 91 kN ab. Obwohl der Kolbenweg nun zurückgenommen wurde, folgte nach wenigen Sekunden in gleicher Weise der Verbundbruch der Laschen 4 bis 2.

#### 6.3.4 Platte 4

Der Bruchablauf ähnelte dem von Platte 3. Beginnend an den bolzenfreien Enden, lösten sich die Laschen bei einer Last von 123 kN kurz nacheinander durch Abfedern auf ganzer Länge vom Beton.

Danach konnte durch erneutes Belasten die Bruchlast der unverstärkten Platte (Stahlfließen) zu  $F_u = 56$  kN entsprechend  $M_u = 64,4$  kNm bestimmt werden. Da in /1/ die Bruchlast der unverstärkten Platte zu 77 kNm ermittelt wurde, ist hier eine Schädigung durch die Vorbelastung im verstärkten Zustand, bei der auch die Streckgrenze der Bewehrung erreicht worden war, anzunehmen.

#### 6.3.5 Platte 5

Der Bruch erfolgte in ähnlicher Weise wie bei Platte 3 und 4 bei einer Last von 115 kN.

#### 6.3.6 Platte 6

Dieser erste Plattenversuch mit beidseitiger Verbolzung unterschied sich von den vorherigen Versuchen durch einen vergleichsweise unauffälligen Verbundbruch, der hier ohne lauten Knall erfolgte.

Der Verbundbruch erfolgte nahezu gleichzeitig bei  $F = 94$  kN an den zwei Laschenenden einer Plattenseite auf ca. 60 cm Länge, ausgehend von einem Biegeriß. Dabei fiel die Last auf  $F = 48$  kN ab.

#### 6.3.7 Platte 7 und 8

Diese beiden kurzen Platten ( $M/Qh = 5,5$ ) unterschieden sich nur in der Endverankerung der Laschen: Platte 7 mit Bolzen, Platte 8 ohne Bolzen. Die Bruchlasten von  $F_{u7} = 153$  kN und  $F_{u8} = 110$  kN verhielten sich wie 1,4 zu 1.

Bei Platte 7 erfolgte bei  $F = 140 \text{ kN}$  an einem Laschenende ein Verbundbruch auf ca. 40 cm Länge. Gleichzeitig fiel bei festgehaltenem Kolbenweg die Last auf 133 kN ab. Durch erneute Steigerung des Kolbenweges ließ sich die Last dann noch bis auf 153 kN erhöhen. Die weitere Verformungszunahme war danach mit einem Zurückgehen der Last verbunden, bis sich bei 148 kN der anfängliche Verbundbruch schlagartig über die halbe Laschenlänge ausdehnte und die Last auf 123 kN abfiel.

Bei Platte 8 trat wenige Sekunden nach dem Erreichen von 110 kN im Verankerungsbereich einer Lasche Verbundbruch ein. Das Hochfedern dieses Laschenendes führt zum vollständigen Ablösen der Lasche. Die Last fiel auf 80 kN ab. Bei erneuter Laststeigerung löste sich auch die andere Lasche in gleicher Weise bei 95 kN ab, wobei die Last auf 68 kN abfiel. Anschließend wurde durch erneutes Belasten die Bruchlast der nun nicht mehr verstärkten Platte zu 77 kN (Stahlfließen) bestimmt.

#### 6.3.8 Platte 9 und 10

Diese beiden 1,80 m breiten Platten unterschieden sich in der Größe des Schubarms  $M/Qh = 5,5$  (Platte 9) bzw. 7,2 (Platte 10). Die zwei Laschen mit einem Querschnitt von  $30 \times 100 \text{ mm}^2$  waren in dem nach der Zulassung /7/ größtmöglichen Abstand von  $5d = 90 \text{ cm}$  angeordnet.

Der Bruchverlauf von Platte 9 glich dem von Platte 7. Kurz vor dem Erreichen von  $F = 220 \text{ kN}$  trat an einem Laschenende Verbundbruch über 40 cm auf, und die Last fiel auf 181 kN ab. Danach war eine erneute Laststeigerung bis auf 234 kN möglich. Bei weiterer Verformungszunahme ging die Last wieder zurück, bis dann bei  $F = 221 \text{ kN}$  an beiden Laschen schlagartig vollständiger Verbundbruch eintrat und die Last auf 46 kN abfiel.

Bei der Platte 10 löste sich bereits während der dynamischen Belastungsphase nach 500 Lastwechseln die hintere Lasche auf

ca. 30 cm Länge unmittelbar vor dem Bolzen vom Beton. In diesem Bereich wölbte sich die Lasche hoch, so daß sich die Bruchfuge um ca. 1 mm öffnete. Für diese vorher noch nie beobachtete Erscheinung wurde folgende Erklärung gefunden: Beim Bohren des Loches für den Bolzen war ein kleiner Ausbruchkrater entstanden. Durch das Vorspannen des Bolzens wurde die Lasche geringfügig in den Ausbruchkrater hineingebogen. Das mußte in einiger Entfernung vom Bolzen zu erheblichen Zugkräften senkrecht zur Klebschicht geführt und damit den vorzeitigen Verbundbruch bewirkt haben.

Die Platte wurde deshalb entlastet, die hintere Lasche abgeholt und nach dem Entfernen der Klebstoffreste neu geklebt. Anschließend wurde die dynamische Belastung fortgesetzt und danach der Bruchversuch durchgeführt. Das Bruchverhalten glich dem von Platte 6.

Bei einer Last von 145 kN entsprechend 80 kN/m trat an einem Laschenende Verbundbruch, verbunden mit einem Lastabfall auf 120 kN  $\hat{=}$  67 kN/m, ein. Bei 150 kN löste sich diese Lasche fast auf ganzer Länge vom Beton. Durch rasches Entlasten konnte eine weitergehende Zerstörung der Platte vermieden werden, obwohl die Dehnungen der Betonstahlmatte an einzelnen Stäben nach dem Ablösen der Lasche über 7 mm/m erreichten.

Nach dem Entfernen der GFK-Laschen wurden an dieselbe Stelle Stahllaschen von 5 x 100 mm<sup>2</sup> Querschnitt aufgeklebt. Nach dem Erhärten des Klebers wurde nach bekanntem Schema belastet. Allerdings wurde bereits nach 10.000 Lastwechseln der Bruchversuch durchgeführt. Dabei erfolgte der Bruch in gleicher Weise wie bei der mit GFK-Laschen verstärkten Platte 10 bei einer Last von 158 kN entsprechend 88 kN/m.

#### 6.4 Folgerungen

Durch Ankleben von GFK-Laschen ist eine Verdoppelung der Bruchlast und mehr möglich. Bei kurzem Schubarm sind der Verstärkung durch die Schubbruchgefahr Grenzen gesetzt. In dieser Hinsicht verhielten sich die laschenverstärkten Platten ähnlich wie solche aus konventionellem Stahlbeton.

Die rechnerische Biegebruchlaststeigerung durch die Laschenverstärkung, gerechnet mit den Rechenfestigkeiten und-arbeitslinien nach DIN 1045 bzw. mit jenen für St 37 bzw. die Laschenmaterialien, beträgt nach Tabelle 5.1 das 2,5- bis 3,5fache des Verstärkungsgrades  $n = A_L E_L / A_S E_S$  für Betonstahl BSt 500 M.

Die tatsächlich erreichten Bruchlaststeigerungen betrugen nur das 1,5- bis 2,1fache des Verstärkungsgrades. Mit den bekannten Rechenverfahren nach DIN 1045 und der Zulassung /7/ war eine Abschätzung der Bruchlast mit hinreichender Genauigkeit nicht möglich.

Die Bruchmomente der Platten waren von gleicher Größenordnung wie die der Platten mit Stahllaschen nach /1/.

## 7. Meßergebnisse

### 7.1 Allgemeines

Im folgenden werden die wichtigsten Meßergebnisse diskutiert. Die elektrisch aufgenommenen und auf Magnetband gespeicherten Meßwerte sind auf den Bildern der Anlage last- oder lastspielzahlabhängig geplottet worden. Dabei sind die Pressenkräfte pro Kolben an der Ordinate aufgetragen. Die Messungen nach 1, 10, 100, 1000, 10 000 und 100.000 Lastwechseln erscheinen bei dieser Darstellung als horizontal nebeneinanderliegende Punkte. Bei der lastspielzahlabhängigen Darstellung wurde für die Abszisse ein logarithmischer Maßstab gewählt. Hier deutet ein geradlinig ansteigender Kurvenverlauf auf eine abnehmende Verformungsgeschwindigkeit hin. Die Nummern der Meßstellen entsprechen denen der Meßstellenpläne (Bilder 4.1 bis 4.11).

Bei den Bildern im Anhang kommen zuerst die Meßergebnisse der kurzen Platten ( $M/Q_h = 5,5$ ) im Abschnitt 7 und anschließend im Abschnitt 8 die Meßergebnisse der langen Platten ( $M/Q_h = 7,2$ ).

### 7.2 Durchbiegung

Die Durchbiegung der Plattenkragarme ist dargestellt als Mittelwert beider Seiten in Abhängigkeit von der Belastung auf Bild 7.1.1 bis 7.1.5 (8.1.1-8.1.6), in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl auf Bild 7.2.1 bis 7.2.5 (8.2.1-8.2.6) und in Form des Kolbenwegs in Abhängigkeit von der Belastung (nur für den Bruchversuch) auf Bild 7.3.1 bis 7.3.5 (8.3.1-8.3.6). Nur in der letzten Darstellungsform sind die tatsächlichen Kräfte bis in Bruchnähe erkennbar. Die Wirkung der Wegsteuerung wird an den Zacken der Durchbiegungslinien sichtbar. Im Versuch traten diese steilen Lastabfälle im Laufe mehrerer Minuten während der Durchführung der Messungen ein. Die Zahl der Zacken entspricht der Laststufen.

Die Durchbiegungslinien sind bis zum Verbundbruch der Laschenenden nur schwach gekrümmt. Bei den Platten mit beidseitig-bolzenverankerten kurzen Laschen (Platte 7 und 9) folgen dem Verbundbruch große Durchbiegungen; die Durchbiegungslinie geht dann rasch in eine Horizontale über.

Bei den langen Platten wird der Einfluß der Bolzenverankerung weniger deutlich.

Während der dynamischen Belastungsphase nehmen die Durchbiegungen nur wenig und mit abnehmender Geschwindigkeit zu, wie die logarithmischen Darstellungen der Bilder 7.2.1 bis 7.2.5 (8.2.1-8.2.6) veranschaulichen. Dennoch nimmt die Biegesteifigkeit durch die dynamische Belastung deutlich ab, wie die Momenten-Krümmungslinien auf Bild 7.4.1 bis 7.4.5 (8.4.1-8.4.4) zeigen. Bis zum Beginn der Lastwechsel stimmte die gemessene Krümmung mit der, die mit dem Programm /8/ berechnet wurde, recht gut überein. Das Ende der Versuchswertelinie entspricht nicht dem Bruch, weil die für die Berechnung der Krümmung benötigten Dehnungen aus Sicherheitsgründen nicht bis in Bruchnähe gemessen werden konnten.

### 7.3 Rißbildung

Die maximale Rißbreite, die stets an dem vorgekerbten Riß in Plattenmitte gemessen wurde, ist auf den Bildern 7.5.1-7.5.5 (8.5.1-8.5.6) in Abhängigkeit von der Last dargestellt. Die Kurven verlaufen ähnlich wie die Durchbiegungslinien. Der Einfluß des Verstärkungsgrades ist wenig signifikant. Vor dem Verbundbruch betragen die maximalen Rißbreiten 0,3 bis 0,4 mm. Sie sind damit um gut 0,1 mm kleiner als bei den Platten mit Stahllaschen. Der Laschenabstand wirkte sich nicht deutlich auf die maximale Rißbreite, die auf der Mitte zwischen den Laschen gemessen wurde, aus.



Die mittlere Rißbreite ist auf den Bildern 7.6.1 bis 7.6.5 (8.6.1-8.6.5) dargestellt. Man erkennt, daß die Rißbreite nach der Verstärkung deutlich langsamer mit der Last zunimmt als vor der Verstärkung. Während der dynamischen Belastung nimmt die mittlere Rißbreite rascher zu als die maximale, siehe hierzu auch die logarithmischen Darstellungen auf den Bildern 7.7.1 bis 7.7.5 (8.7.1-8.7.6). Nach Abschluß der 100.000 Lastwechsel betrugen die mittleren Rißbreiten stets weniger als 0,2 mm.

Die Rißbilder zeigen die Fotos 7.8.1 bis 7.8.5. 80-90% der Risse sind stets bereits bei der Vorbelastung der unverstärkten Platte entstanden. Eine Rißverzweigung zu den Laschen hin ist nur selten zu beobachten.

#### 7.4 Dehnungen

Auf den Bildern 7.9.1 bis 7.9.5 (8.9.1-8.9.6) sind die maximalen Dehnungen von Laschen und Bewehrung im Riß dargestellt. Die Laschendehnungen sind wegen ihres größeren Abstandes von der Nulllinie erwartungsgemäß größer als die Stahldehnungen. Ein Zurückgehen der Laschendehnungen deutet auf Verbundbruch hin. Nach dem Überschreiten der Streckgrenze des Mattenstahls können die Stahldehnungen ein Mehrfaches der Laschendehnungen betragen (z.B. Bild 7.9.3).

Die Bilder 7.10.1 bis 7.10.5 (8.10.1-8.10.6) zeigen die mit DMS gemessenen Laschendehnungen im Riß im Verankerungsbereich der Laschen. Die Steigung dieser Linien nimmt zum Laschenende hin zu. Ihre Krümmungen sind überwiegend affin. Vereinzelt lassen zurückgehende Dehnungen auf bereichsweise Verbundstörungen schließen (z.B. Bild 7.10.1).

Bei der laststufenzahlabhängigen Darstellung (Bilder 7.11.1-7.11.5, 8.11.1-8.11.6) verlaufen die Linien ganz überwiegend parallel zur Abszisse, d.h. eine dynamisch bedingte Verformungsänderung oder Kraftumlagerung findet kaum statt (Ausnahme: Platte 10, Bilder 8.11.5 u. 8.11.6).

Die mit Setzdehnungsmesser gemessenen, mittleren Dehnungen von Lasche und Beton (in Höhe der Bewehrung) im Bereich des konstanten Moments sind auf den Bildern 7.12.1 bis 7.12.5 (8.12.1-8.12.5) dargestellt. Diese mittleren Dehnungen unterscheiden sich nicht auffällig von den bereits beschriebenen Dehnungen im Riß.

### 7.5 Endverschiebungen der Laschen

Die an den Laschenenden gemessenen Verschiebungen sind auf den Bildern 7.13.1 bis 7.13.4 und 8.13.1 bis 8.13.5 für den Bruchversuch in Abhängigkeit von der Belastung und auf den Bildern 7.14.1 bis 7.14.4 und 8.14.1 bis 8.14.5 für die dynamische Belastungsphase in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl dargestellt.

Bis zum Beginn der dynamischen Belastung stellten sich stets nur sehr geringe Verschiebungen proportional zur Belastung ein. Bei den Platten Nr. 1, 2 und 3 mit jeweils 5 Laschen betrug die maximale Verschiebung beim ersten Erreichen der Oberlast 0,002 bis 0,004 mm. Bei den übrigen Platten mit 2 Laschen waren die entsprechenden Werte etwa 10mal so groß.

Während der dynamischen Belastung neigten die unverbolzten Laschenenden mehr als die verbolzten zu einer beschleunigten Zunahme der Verschiebungen. Das dynamische Verhalten muß jedoch noch intensiver erforscht werden, insbesondere auch aus dem Grunde, weil sich Meßwerte gleichartiger Meßstellen häufig um Größenordnungen unterscheiden.

Die während des Bruchversuchs aufgezeichneten Last-Verschiebungslinien verliefen bis in Bruchnähe annähernd linear mit einer Zunahme der Verschiebung von 0,01 mm. In Bruchnähe nahmen dann in der Regel zunächst nur die Verschiebungen einer Lasche unvermittelt sehr rasch zu. Die zusätzliche Bolzenverankerung beeinflusste die Verschiebungen wenig deutlich. Diese rasche Verschiebungszunahme ließ sich in der Regel auch durch ein Anhalten der Laststeigerung nicht mehr zum Stoppen bringen.

Die gemessenen Maximalwerte der Verschiebung im Bruchzustand streuten stark von 0,06 bis 0,53 mm.

Nur bei der Platte 10 (Bild 8.13.5) zeigen die Verschiebungslinien, daß hier nach dem Verbundbruch der Klebung die Bolzen eine weitere Laststeigerung ermöglichten.

## 7.6 Zugkraftlinien und Verbundspannungen

Aus den im Verankerungsbereich der Laschen gemessenen Dehnungen lassen sich durch Multiplikation mit E-Modul und Querschnittsfläche die Laschenzugkräfte an einzelnen Punkten berechnen. Die Verbindung dieser Punkte liefert laststufenabhängige Zugkraftlinien.

Auf Bild 7.15.1, 8.15.1 und 8.15.2 sind die Zugkraftlinien der Laschen für die Platten 7, 8, 4 und 5 dargestellt. Diese Bilder sollen vor allem die Wirkung der Bolzenverankerung zeigen. Bei den kurzen Platten sind die Zugkräfte aus den mit Setzdehnmessern (SDM) gemessenen Dehnungen und bei den langen Platten aus den mit Dehnmeßstreifen (DMS) in Rissen gemessenen Dehnungen berechnet worden. Die Ergebnisse unterscheiden sich nur geringfügig.

Bei den Laschen ohne Bolzenverankerung ergeben sich ziemlich geradlinige Zugkraftlinien. Das Versatzmaß wird nur bei den langen Platten bei höheren Lasten sichtbar.

Bei der Bolzenverankerung ergeben sich gekrümmte bzw. geknickte Zugkraftlinien. Die Krümmung nimmt mit steigender Belastung zu.

Durch abschnittsweise Differentiation der Zugkraftlinien lassen sich die Verbundspannungen in der Klebschicht grob berechnen und in Form einer Treppenlinie darstellen (Bild 7.15.2).

Man erkennt, daß bei niedrigeren Lasten unabhängig von der Bolzenverankerung die Verbundspannung vom Lastangriffspunkt zum Laschenende hin geringfügig von rund 0,8 auf 1,2 N/mm<sup>2</sup> ansteigt. Dieser Spannungszustand führt bei bolzenlosen Laschen bereits zum Verbundbruch. Bei der verbolzten Lasche hingegen ist eine weitere Laststeigerung möglich, die zu einem sprunghaften Anstieg der Verbundspannungen im Bereich des Bolzens auf über 3 N/mm<sup>2</sup> führt.

Die so ermittelten Verbundspannungen stehen insofern im Widerspruch zu den Beobachtungen im Versuch, wonach der Verbundbruch nicht vom Laschenende her mit den höheren Verbundspannungen seinen Anfang nahm, sondern stets von der Nähe des Lastangriffspunktes her.

Es muß angenommen werden, daß die Zugkraftlinien zu grob aufgenommen worden sind, wodurch die bruchauslösenden, steilen Verbundspannungsspitzen, die nach /9/ in der Größenordnung von 8-20 N/mm<sup>2</sup> liegen, nivelliert werden.

Die Verbundspannungsverteilung im Verankerungsbereich der Laschen muß noch weiter erforscht werden.

## 7.7 Dehnungszustände

Die Dehnungszustände im Bereich des konstanten Moments lassen sich aus den dort mit SDM gemessenen und gemittelten Beton- und Laschendehnungen ermitteln. Sie sind auf Bild 7.16 und 8.16 jeweils für die Oberlast vor Beginn der Lastwechsel und für die letzte Messung vor dem Bruch dargestellt. Die dazugehörigen Stahl- und Laschendehnungen im Riß sind als Punkte zusätzlich mit aufgetragen.

Die 3 Punkte der Dehnungsmessungen ( $\epsilon_b'$ ,  $\epsilon_b$  und  $\epsilon_L$ ) ließen sich für alle Platten mit Ausnahme von Platte 9 und 10 S

durch eine annähernd gerade Linie verbinden, d.h. die Querschnitte blieben überwiegend eben. Die Stahl- und Laschen-  
dehnungen im Riß lagen stets in unmittelbarer Nähe zu den  
Dehnungslinien der gemittelten Dehnungen. Bei den meisten  
Platten zeigte sich mit steigender Belastung eine paradoxe  
Tendenz, wonach die Nulllinie zur Zugseite hin wanderte.

Die von DIN 1045 vorgegebenen Dehnungszustände im Bruchzu-  
stand wurden bei weitem nicht erreicht.

## 8. Zusammenfassung und Wertung

Es wurden zehn Platten, die unterschiedlich mit angeklebten GFK-Laschen verstärkt worden waren, kombiniert statisch/dynamisch in Biegeversuchen geprüft. Eine Platte ist nach dem Entfernen der GFK-Laschen durch angeklebte Stahllaschen gleicher Dehnsteifigkeit verstärkt und erneut geprüft worden.

Zum Kleben wurde ein zweikomponentiger Epoxidharzklebstoff verwendet, der zum schubfesten Verkleben von Stahlblechen mit Beton vom Institut für Bautechnik seit 1979 zugelassen ist.

Die GFK-Laschen stammten von zwei verschiedenen Herstellern. Sie unterschieden sich im wesentlichen im Elastizitätsmodul. Die Verträglichkeit der Laschen mit dem Kleber wurde in einer früheren Forschungsarbeit untersucht. Bei der Herstellung, Verstärkung und Belastung der Platten wurde weitestgehend analog zu früheren Versuchen mit angeklebten Stahllaschen verfahren. Hier wie dort sollte in erster Linie der Einfluß der Laschengometrie auf die mögliche Laststeigerung und auf das Riß- und Verformungsverhalten studiert werden.

Hinsichtlich der erreichten Bruchlasten ergab sich zunächst, daß mit aufgeklebten GFK-Laschen ebenso wie mit Stahllaschen eine Verdopplung der Biegebruchlast und mehr möglich ist. Allerdings wurden die mit den Annahmen und Arbeitslinien der DIN 1045 zu errechnenden Biegebruchmomente bei weitem nicht erreicht. Die Ursache hierfür dürfte darin zu suchen sein, daß die vorhandenen Verankerungslängen nicht ausreichten, die höheren Laschenzugkräfte der GFK-Laschen im Vergleich zu Stahllaschen aufzunehmen. Da GFK-Laschen keine Streckgrenze besitzen, steigen ihre Zugkräfte mit zunehmendem Moment ja stetig an, während bei Stahllaschen aus St 37 recht frühzeitig das Erreichen der Streckgrenze eine weitere Zunahme der Laschenkräfte beendet.

Mit den bekannten Rechenverfahren war eine hinreichend genaue Vorausberechnung weder für das Biegebruchmoment noch für die Schubbruchlast möglich. Hierbei muß jedoch auch berücksichtigt werden, daß das Verbundversagen der Klebungen von der Zugfestigkeit des Betons abhängt und entsprechend großen Streuungen unterliegt. Aus demselben Grunde konnten auch die Einflüsse der Laschengeometrie auf das Tragverhalten der Platten aus den Versuchen noch nicht zuverlässig abgelesen werden.

Eine zusätzliche Endverankerung der Laschen durch vorgespannte Bolzen bewirkte vornehmlich bei den kurzen Platten mit entsprechend kurzer Verankerungslänge der Laschen eine Bruchlaststeigerung. In den Fällen, wo eine Bruchlaststeigerung durch die Bolzen weniger deutlich wurde, trat der Bruch jedoch weniger spröde ein, so daß eine derartige zusätzliche Endverankerung grundsätzlich zu empfehlen ist. Insgesamt muß das Problem der Verankerung von Laschen und deren rechnerische Behandlung noch intensiv erforscht werden.

Das Riß- und Verformungsverhalten der laschenverstärkten Platten glich dem von konventionellem Stahlbeton. Die GFK-Laschen scheinen sich etwas günstiger auszuwirken als Stahllaschen.

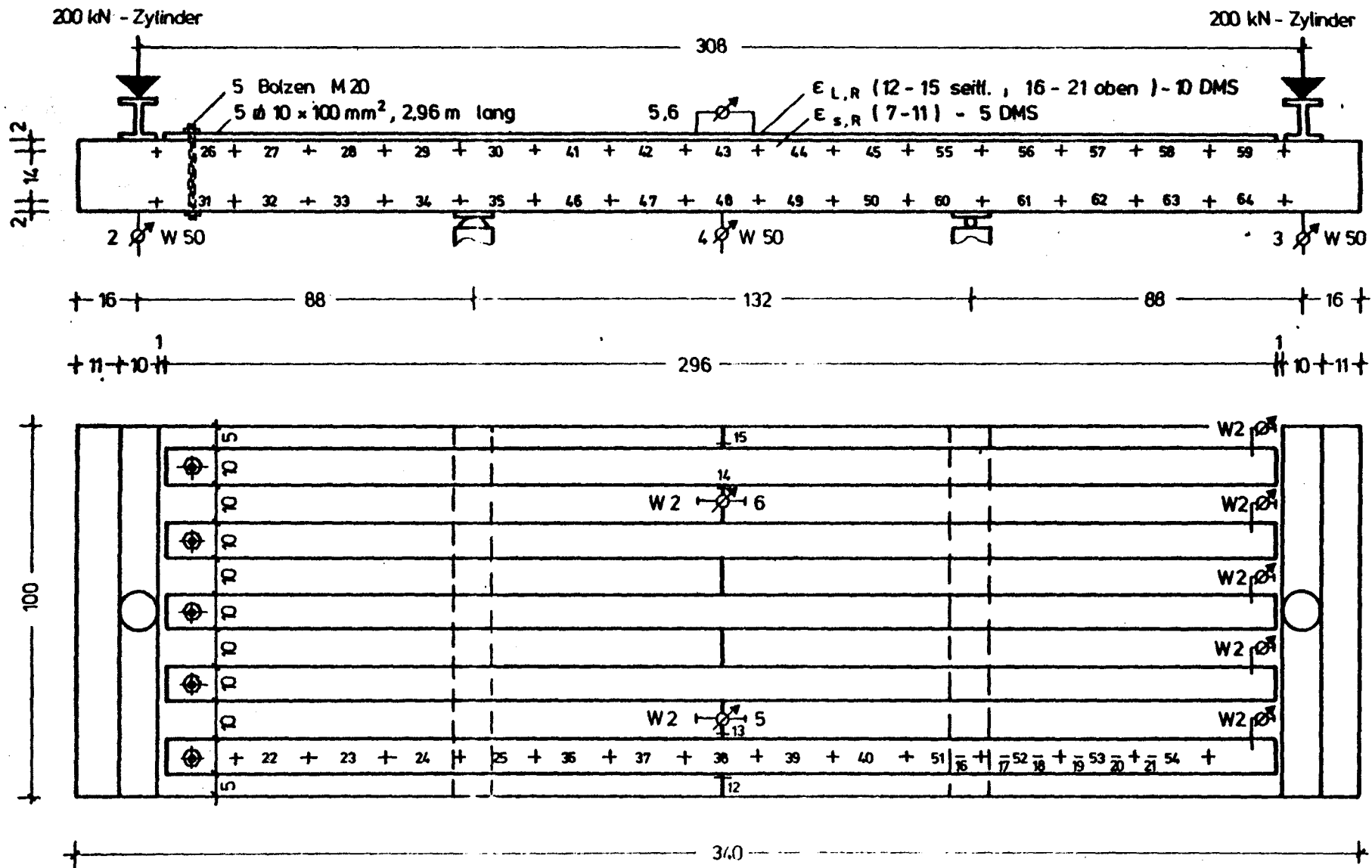
## Literaturliste

---

- /1/ ROSTASY, FERDINAND S; RANISCH, ERNST-H.  
NACHTRAEGELICHE VERSTAERKUNG VON STAHLBETONPLATTEN  
DURCH ANKLEBEN VON BEWEHRUNG  
TU-BRAUNSCHWEIG, INST.F.BAUSTOFFE, MASSIVBAU U.BRANDSCHUTZ /  
LAND NIEDERSACHSEN - BRAUNSCHWEIG : FORSCHUNGSBERICHT 1983
- /2/ LADNER, MARC; WEDER, CHRISTIAN  
LANGZEITVERSUCHE AN STAHLBETONBALKEN MIT GEKLEBTER  
BEWEHRUNG  
IN:FESTSCHRIFT 100 JAHRE EMPA,DUEBENDORF 1980, S.44-51
- /3/ LLOYD, G.O. ; CALDER, A.J.J.  
THE MICROSTRUCTURE OF EPOXY BONDED STEEL-TO-CONCRETE JOINTS  
TRRL CHROWTHORNE BERKSHIRE:TRRL 1982,SUP.REP.705
- /4/ ROSTASY, FERDINAND S; RANISCH, ERNST-H.  
EINFLUSS VON TEMPERATUREN BIS 60 GRAD C UND HOHER  
LUFTFEUCHTIGKEIT AUF DAS DAUERVERHALTEN VON  
TRAGENDEN VERKLEBUNGEN VON BETON UND STAHL  
FORSCHUNGSARBEIT LAND NIEDERSACHSEN, ERL.-NR.13/80  
ABSCHLUSSBERICHT: 1988
- /5/ ROSTASY, FERDINAND S; RANISCH, ERNST-H.  
SANIERUNG VON BETONTRAGWERKEN  
DURCH ANKLEBEN VON FASERVERBUNDWERKSTOFFEN  
FORSCHUNGSARBEIT LAND NIEDERSACHSEN, ERL.-NR. 6/82,  
INST. F. BAUSTOFFE, MASSIVBAU U. BRANDSCHUTZ,  
ABSCHLUSSBERICHT: 1984
- /6/ RAFLA, K.  
EMPIRISCHE FORMELN ZUR BERECHNUNG DER SCHUBTRAGFAHIGKEIT  
VON STAHLBETONBALKEN.  
IN: STRASSE BRUCKE TUNNEL 23(1971) 311-320.
- /7/ TAUSKY, ROBERT  
SCHUBFESTE KLEBEVERBINDUNG ZWISCHEN STAHLPLATTEN UND  
STAHLBETONBAUTEILEN  
ZULASSUNGSBESCHEID NR.Z-26.1-1, INST.F.BAUTECHNIK BERLIN
- /8/ QUAST, ULRICH ; GRZESCHKOWITZ, REINHARD  
PROGRAMMGESTEUERTES BERECHNEN IM MASSIVBAU.  
SCHRIFTENREIHE DES DAFSTB (1986 IN VORBEREITUNG)
- /9/ RANISCH, ERNST-H.  
ZUR TRAGFAEHIGKEIT VON VERKLEBUNGEN ZWISCHEN BAUSTAHL UND  
BETON - GEKLEBTE BEWEHRUNG -  
(DISS. TU - BRAUNSCHWEIG 1982 )



## Platte 1



Masse in g:

**Bild 4.1 : Meßstellenplan Platte 1**

# Platte 2

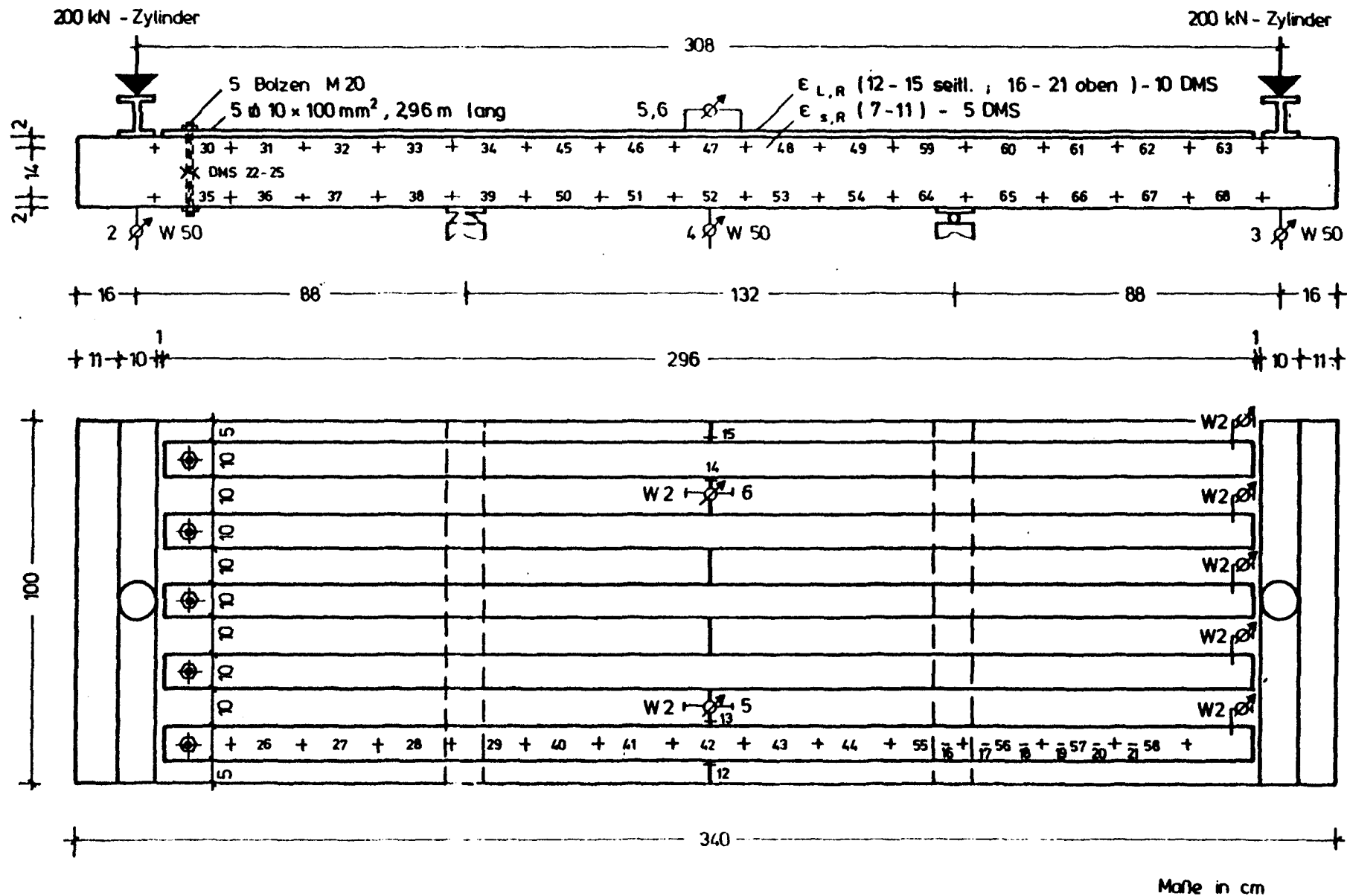


Bild 4.2 : Meßstellenplan Platte 2

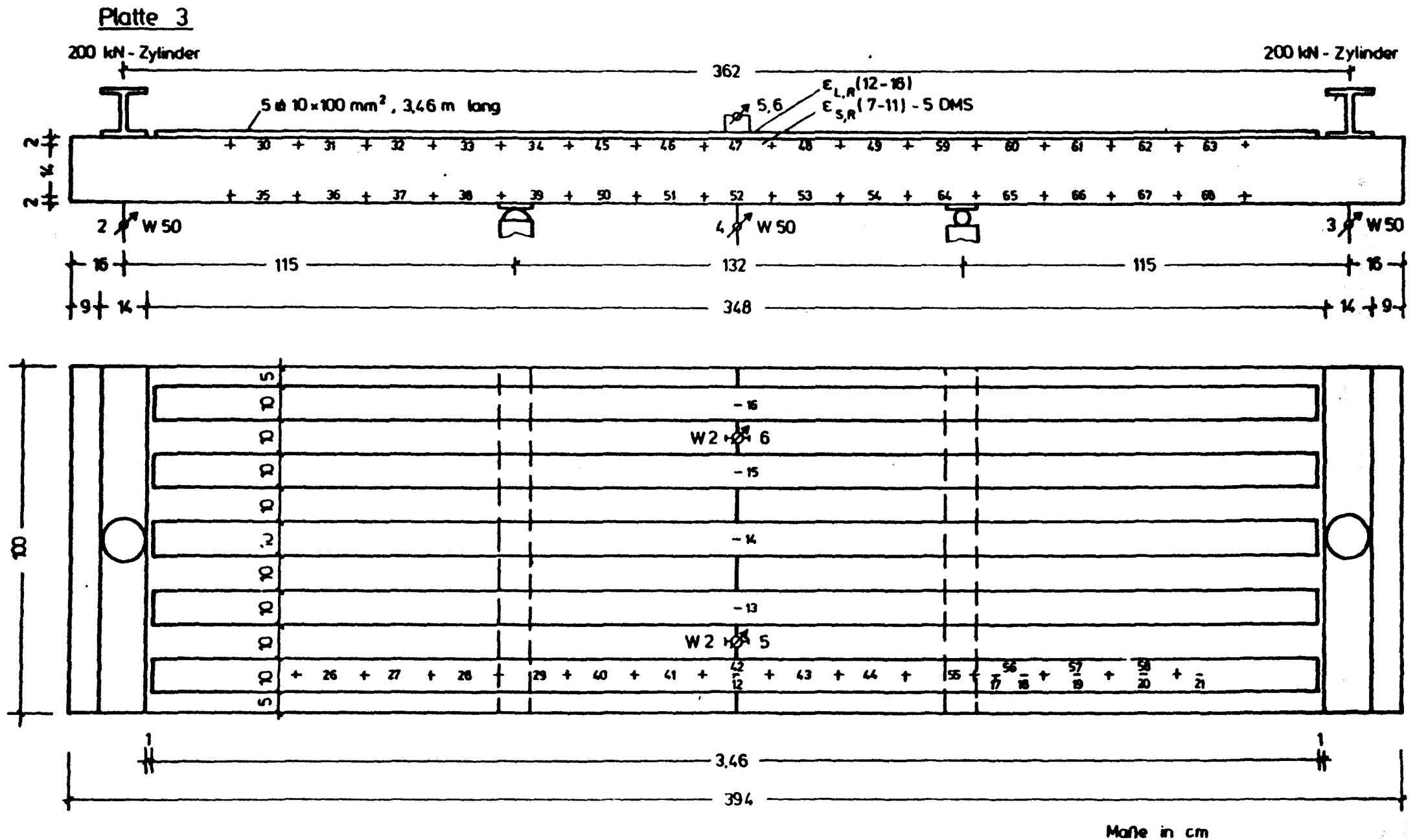


Bild 4.3 : Meßstellenplan Platte 3

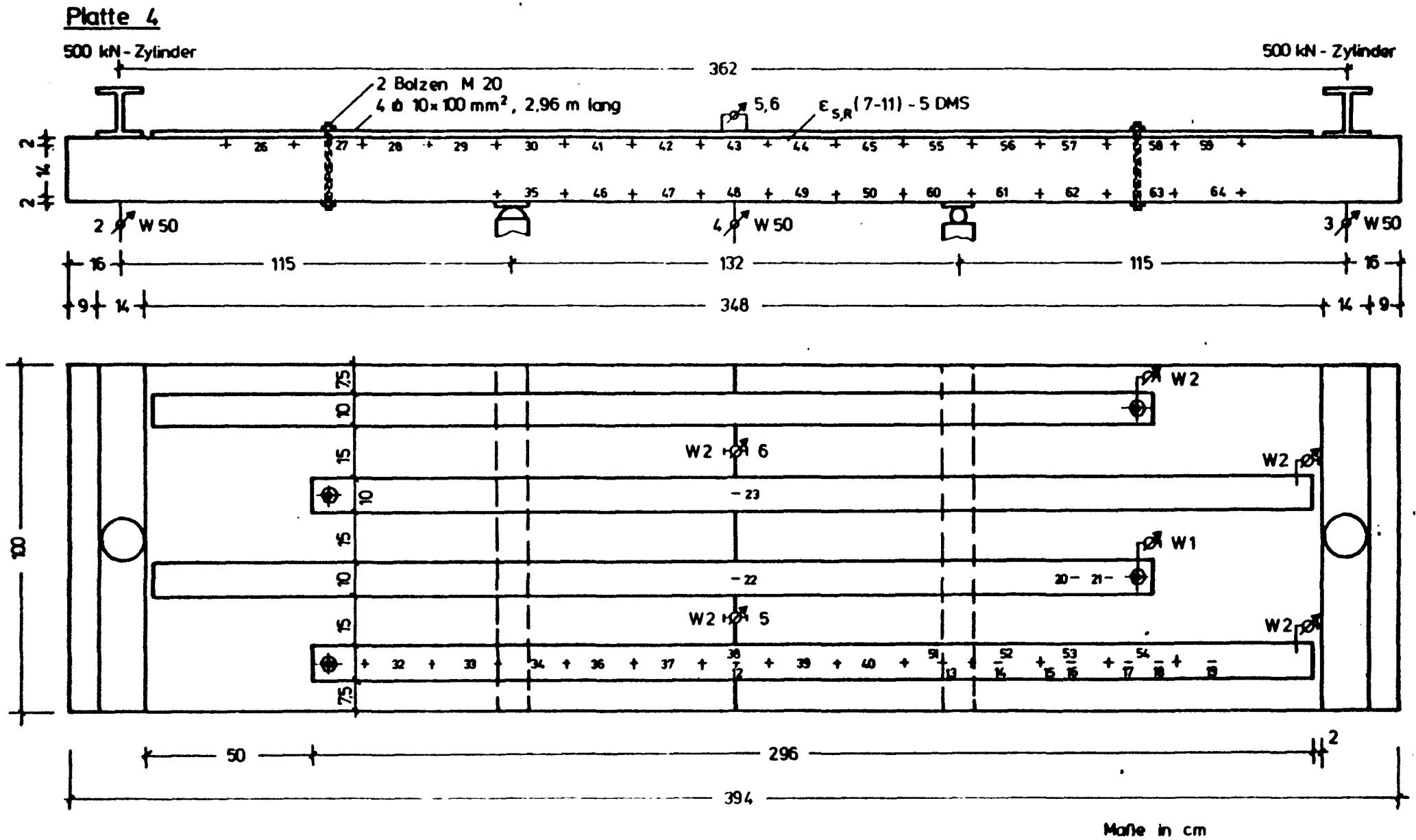


Bild 4.4 : Meßstellenplan Platte 4

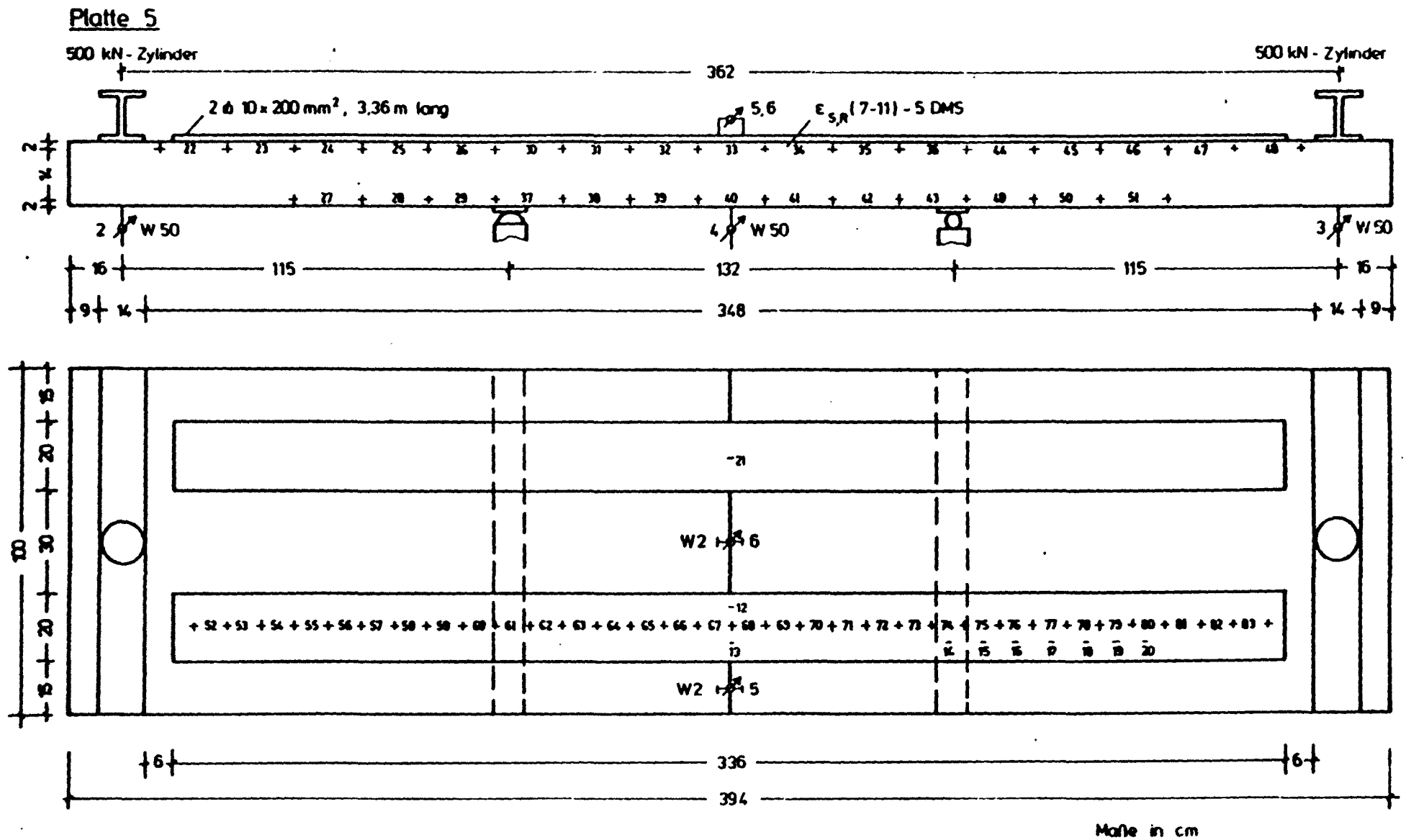


Bild 4.5 : Meßstellenplan Platte 5

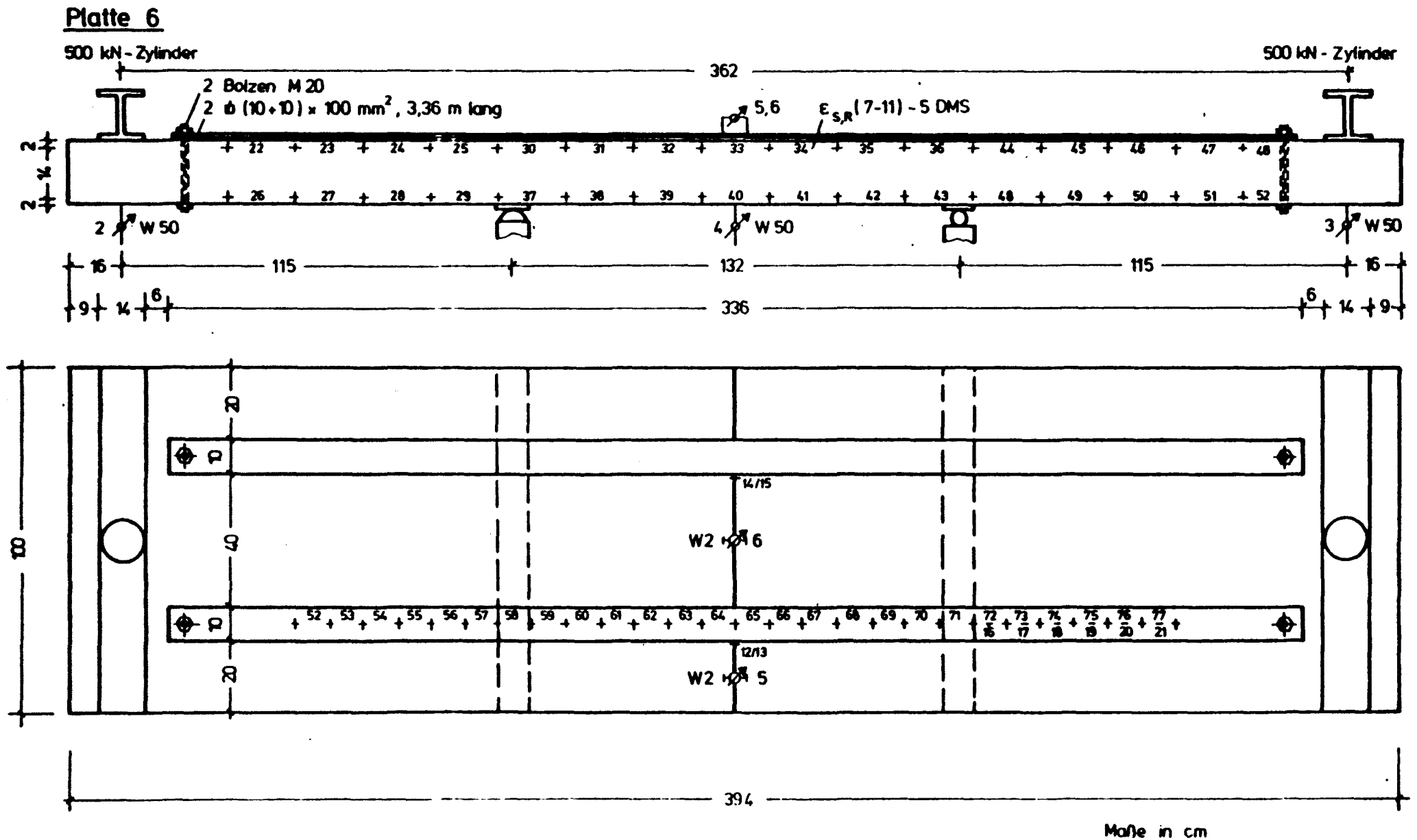


Bild 4.6 : Meßstellenplan Platte 6

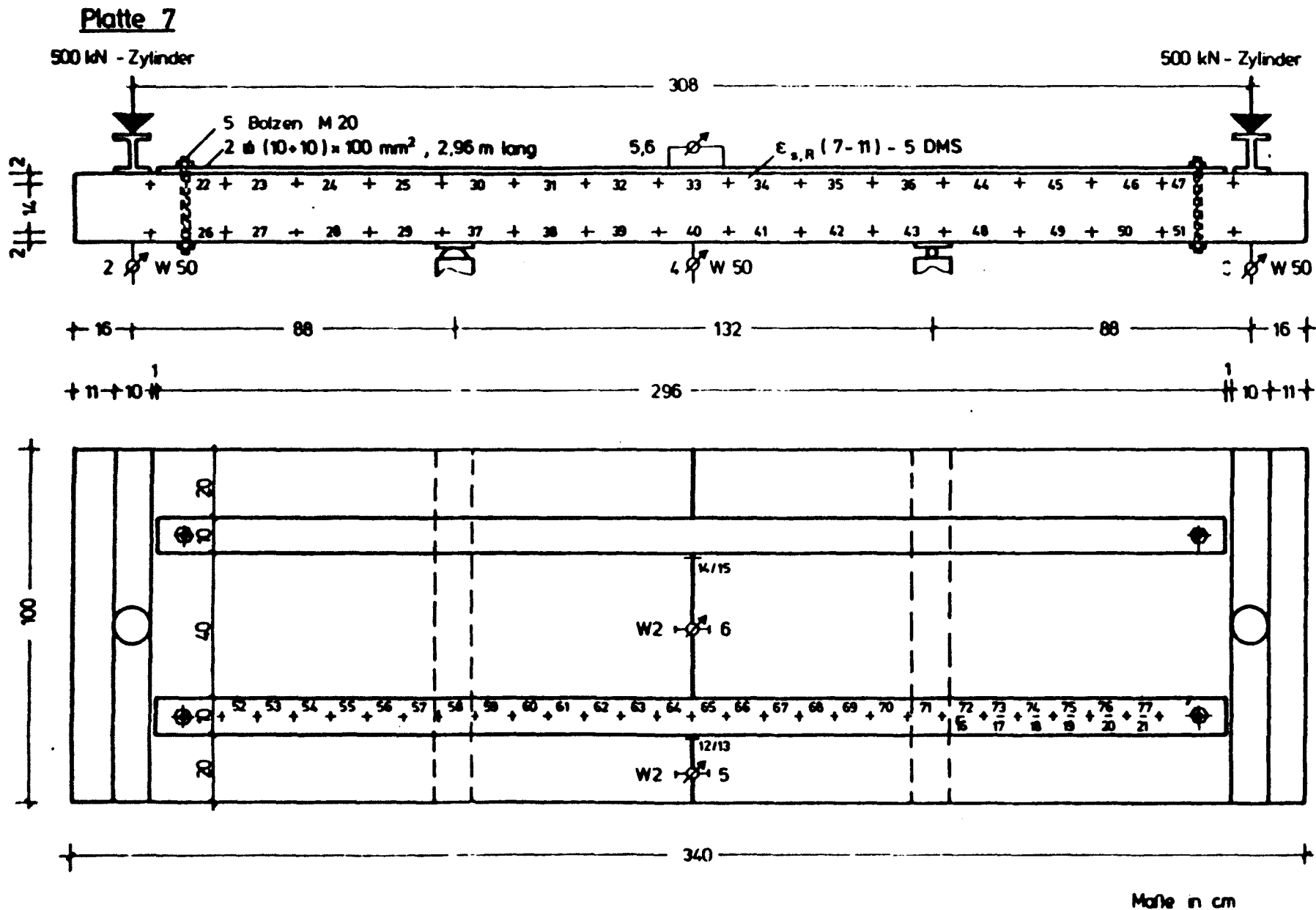


Bild 4.7 : Meßstellenplan Platte 7

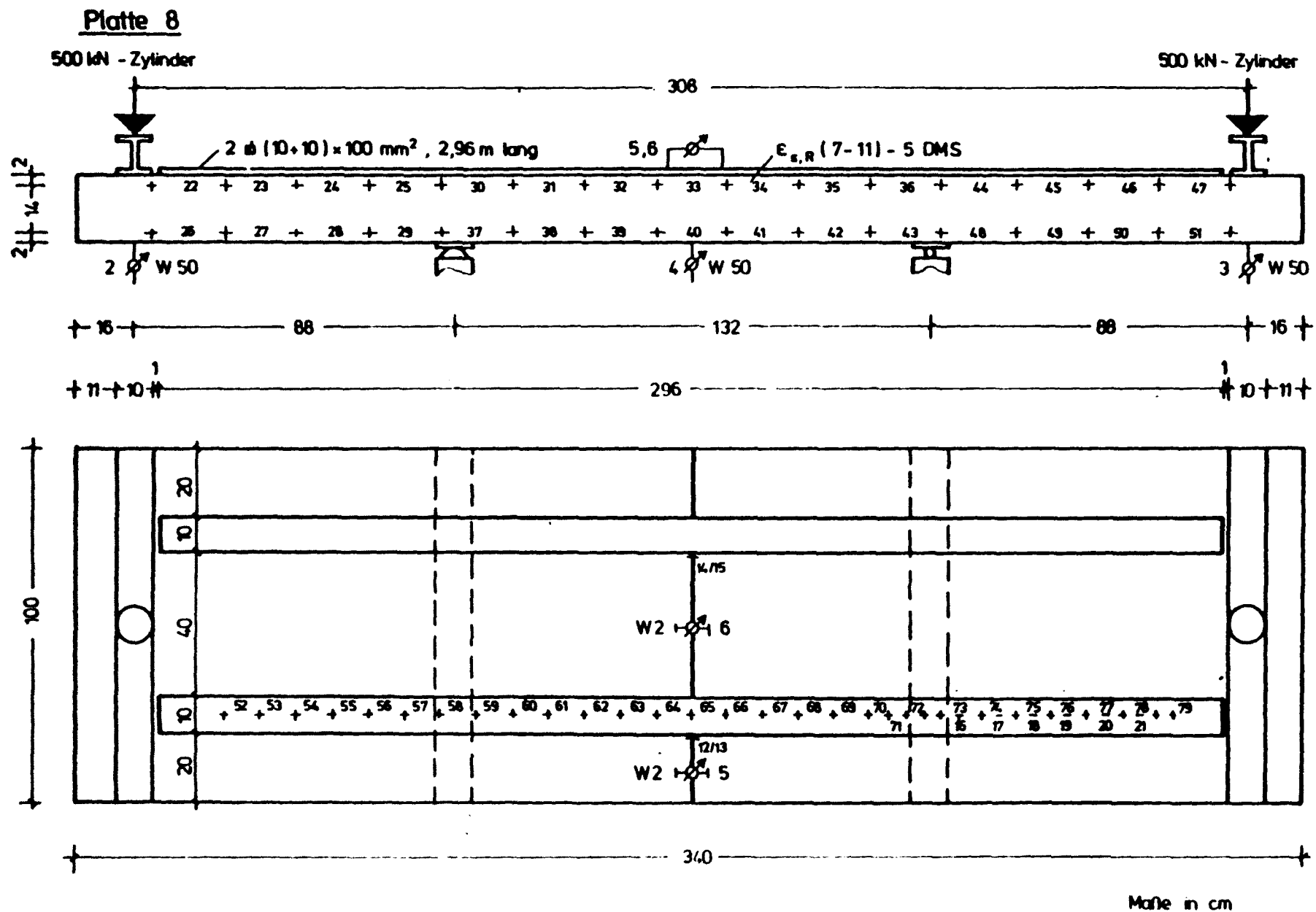


Bild 4.8 : Meßstellenplan Platte 8



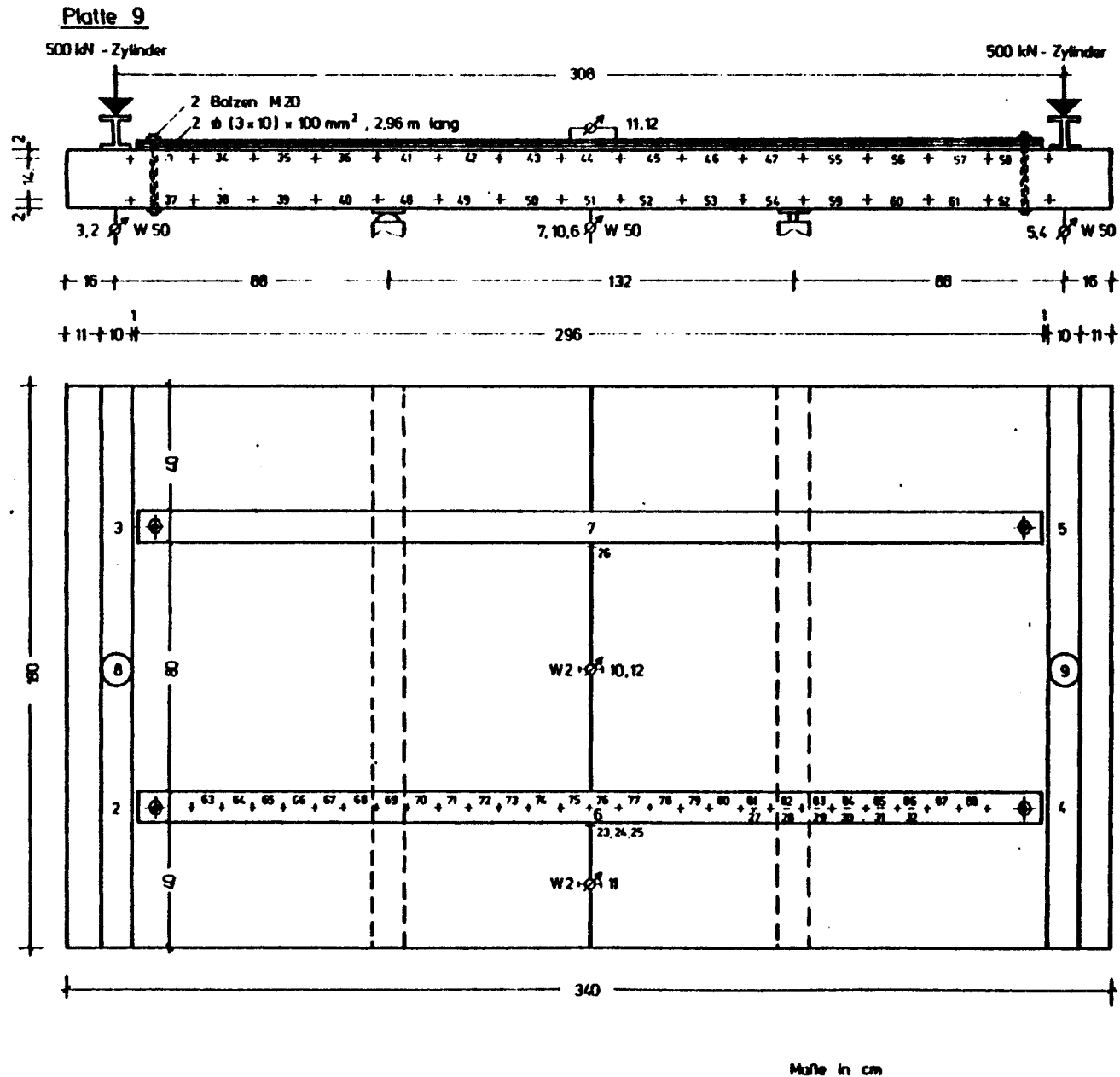


Bild 4.9 : Meßstellenplan Platte 9

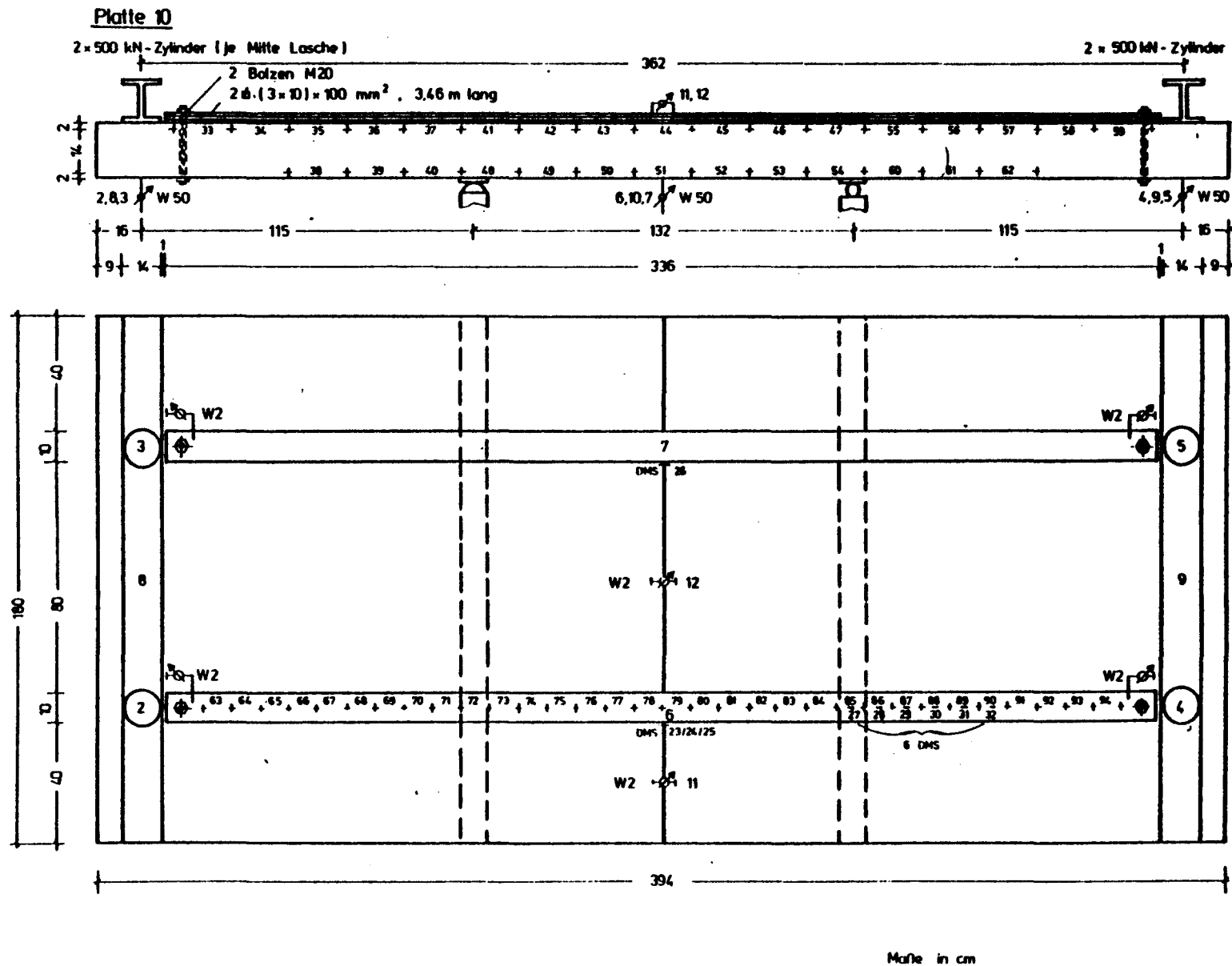
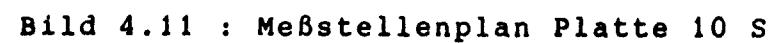


Bild 4.10 : Meßstellenplan Platte 10



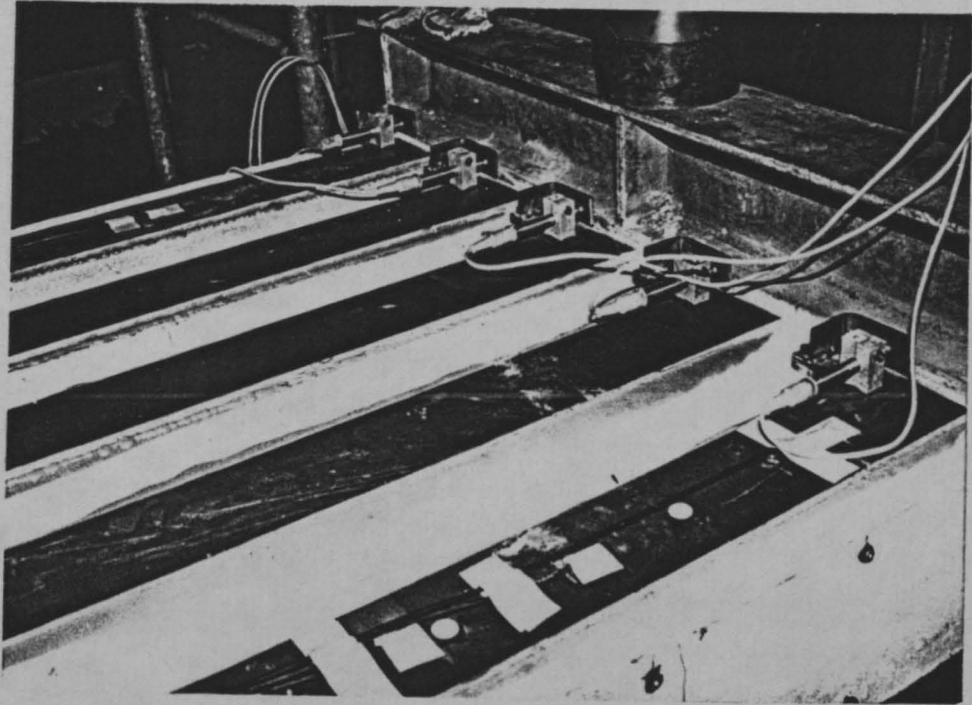


Bild 4.12 : Messung der Endverschiebungen  
der Laschen (Platte 1 )

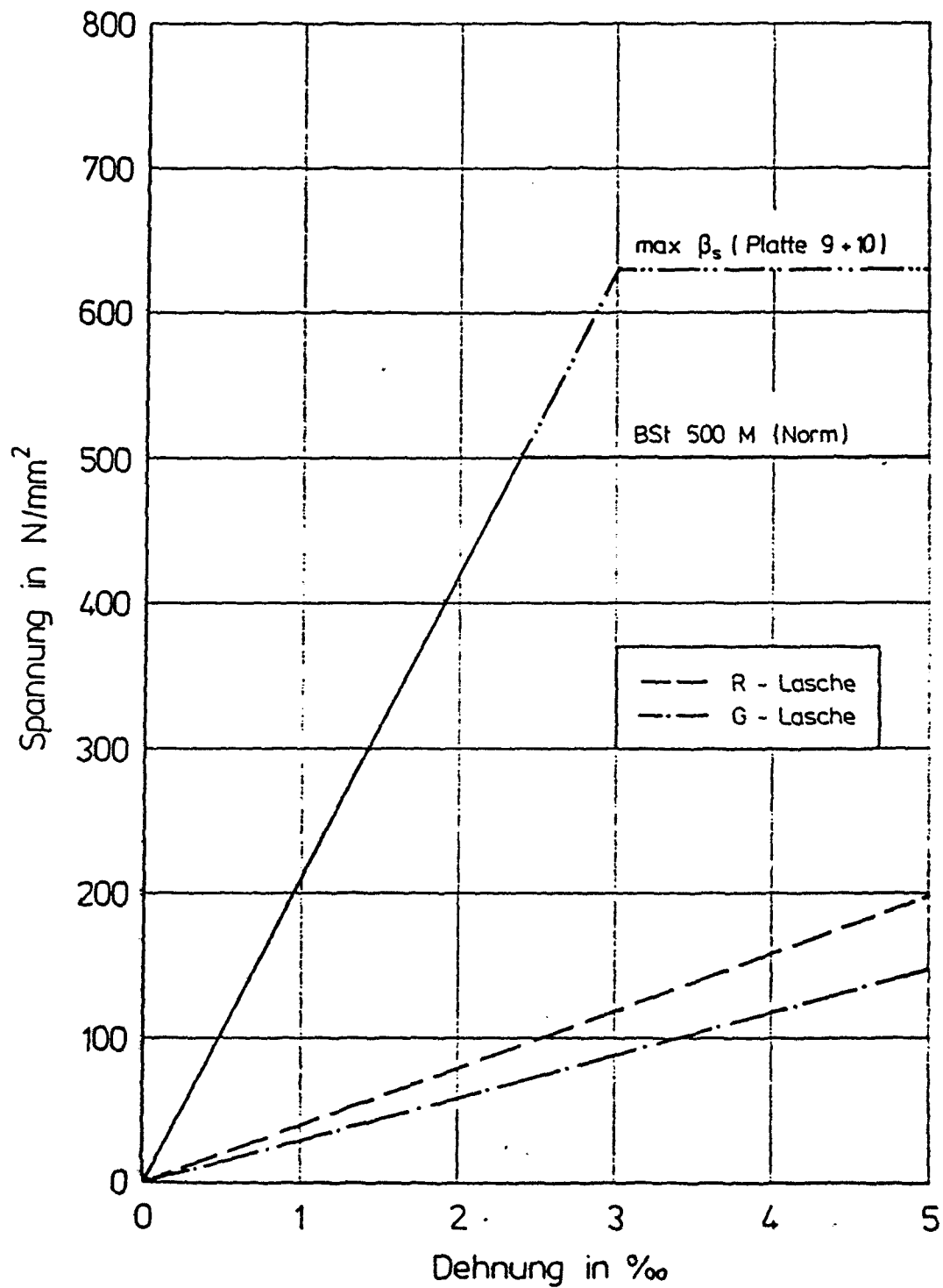


Bild 5.1 : Spannungs-Dehnungslinien von Laschen und Bewehrung

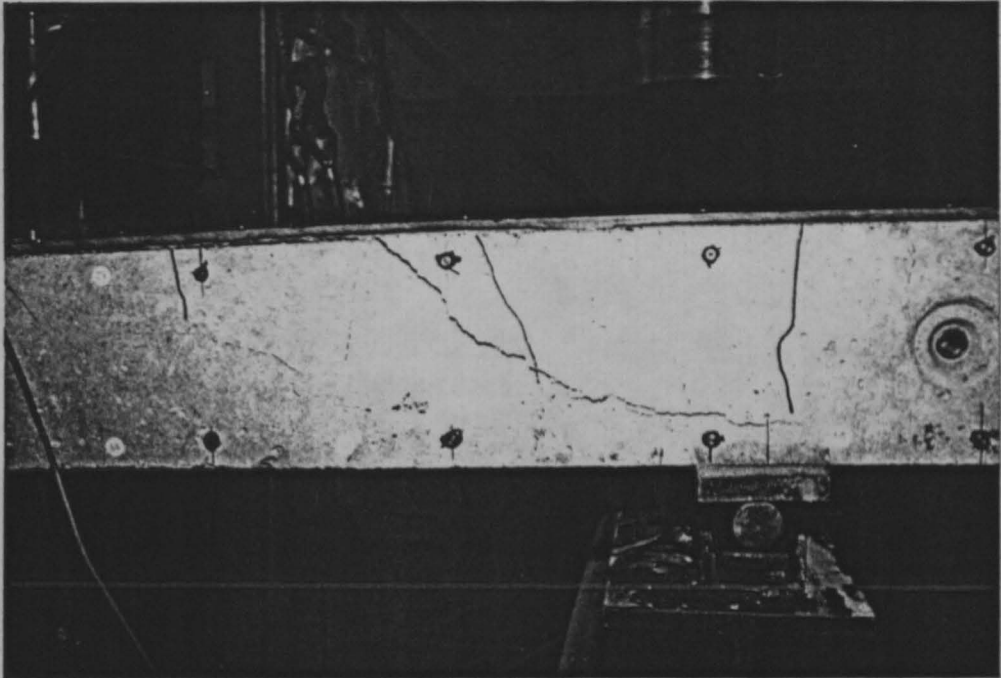


Bild 6.1 : Schubrißbildung und Verbundbruch  
bei Platte 1.

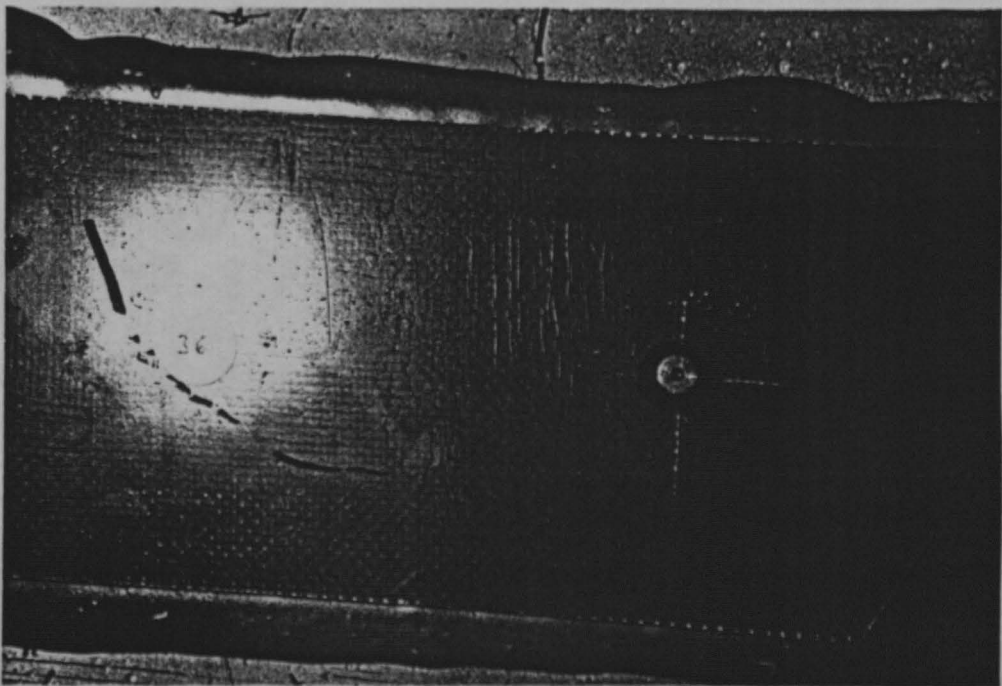
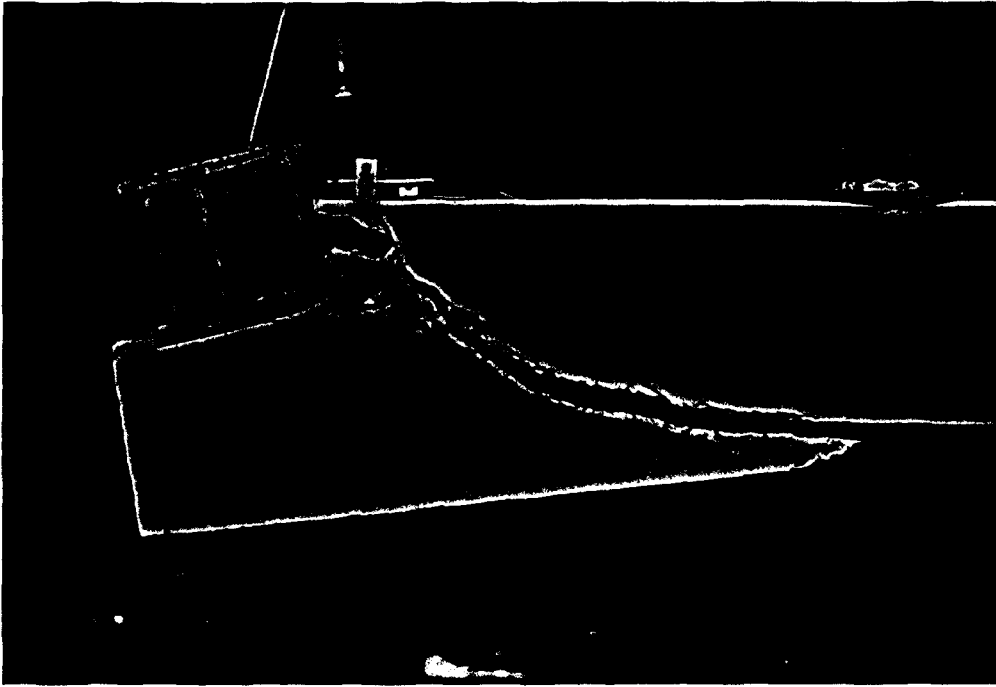
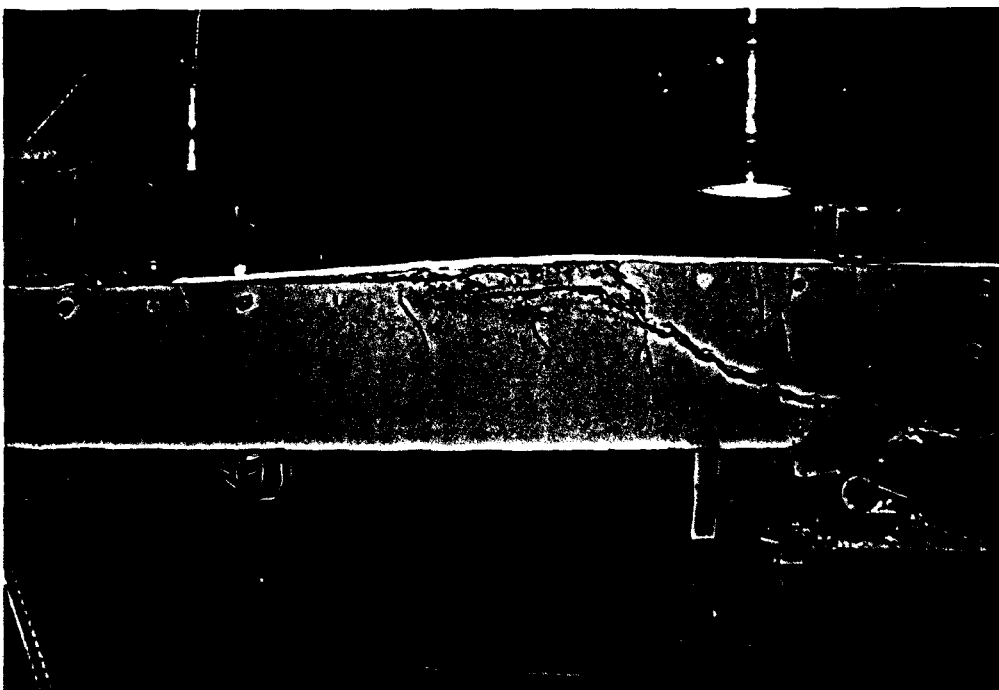


Bild 6.2 : Rißbildung an einer GFK-Lasche



**Bild 6.3 : Erster Schubbruch bei Platte 2**



**Bild 6.4 : Zweiter Schubbruch bei Platte 2**

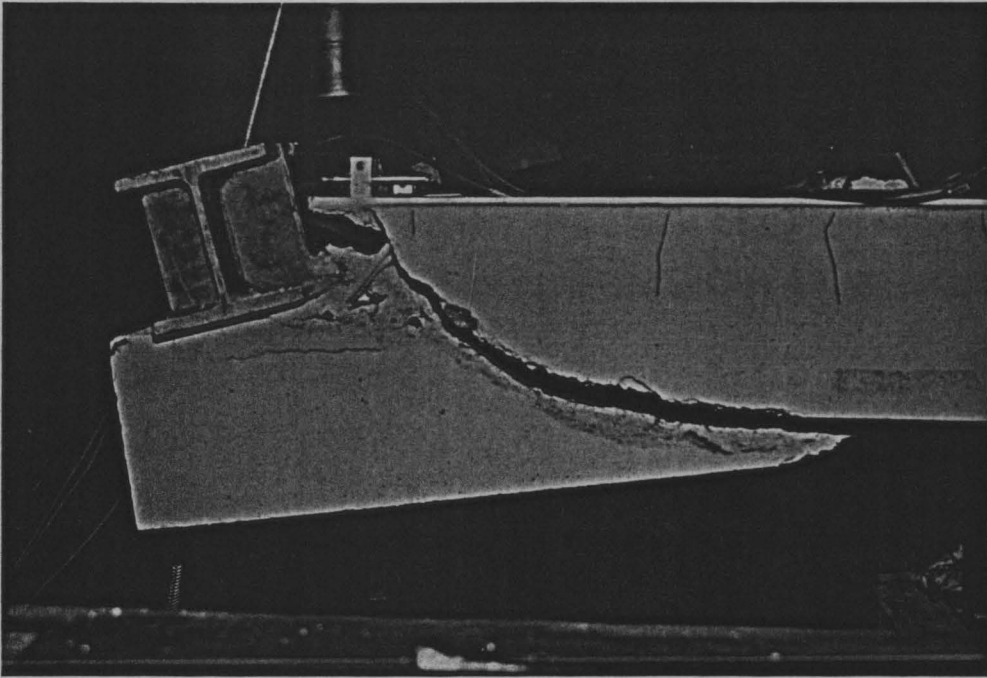


Bild 6.3 : Erster Schubbruch bei Platte 2

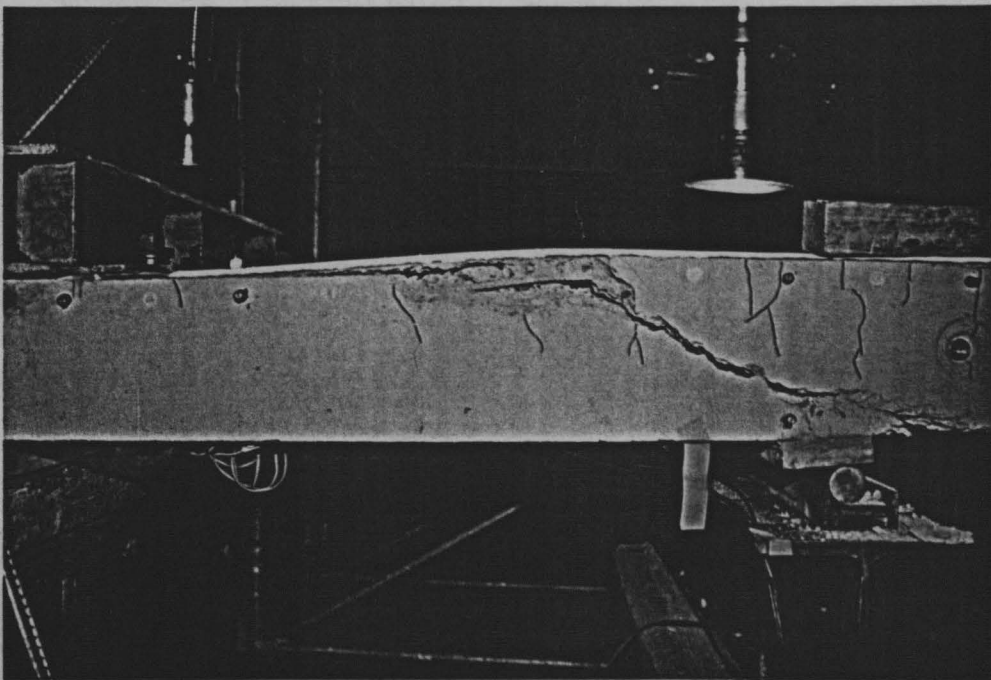


Bild 6.4 : Zweiter Schubbruch bei Platte 2



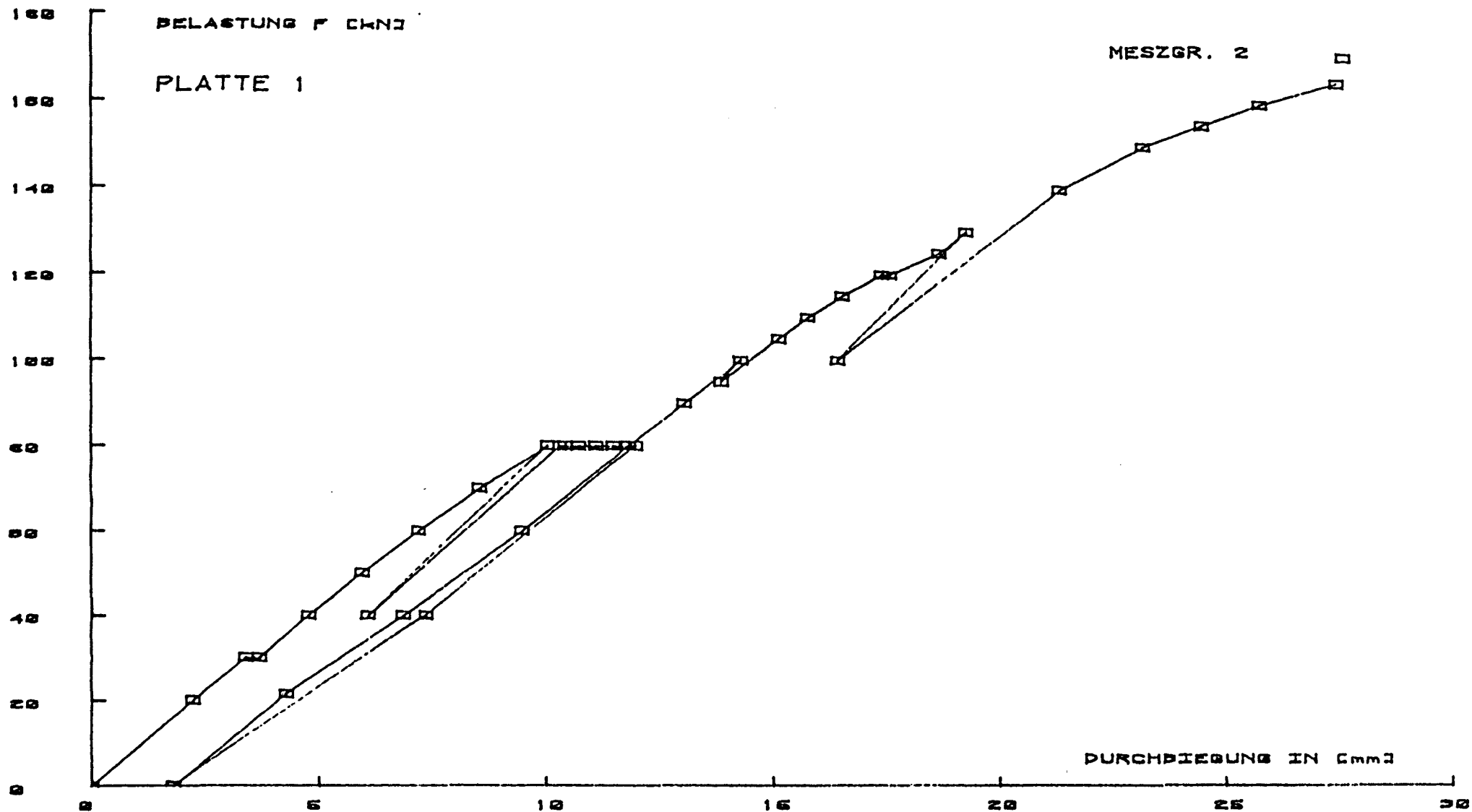


Bild 7.1.1: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 1

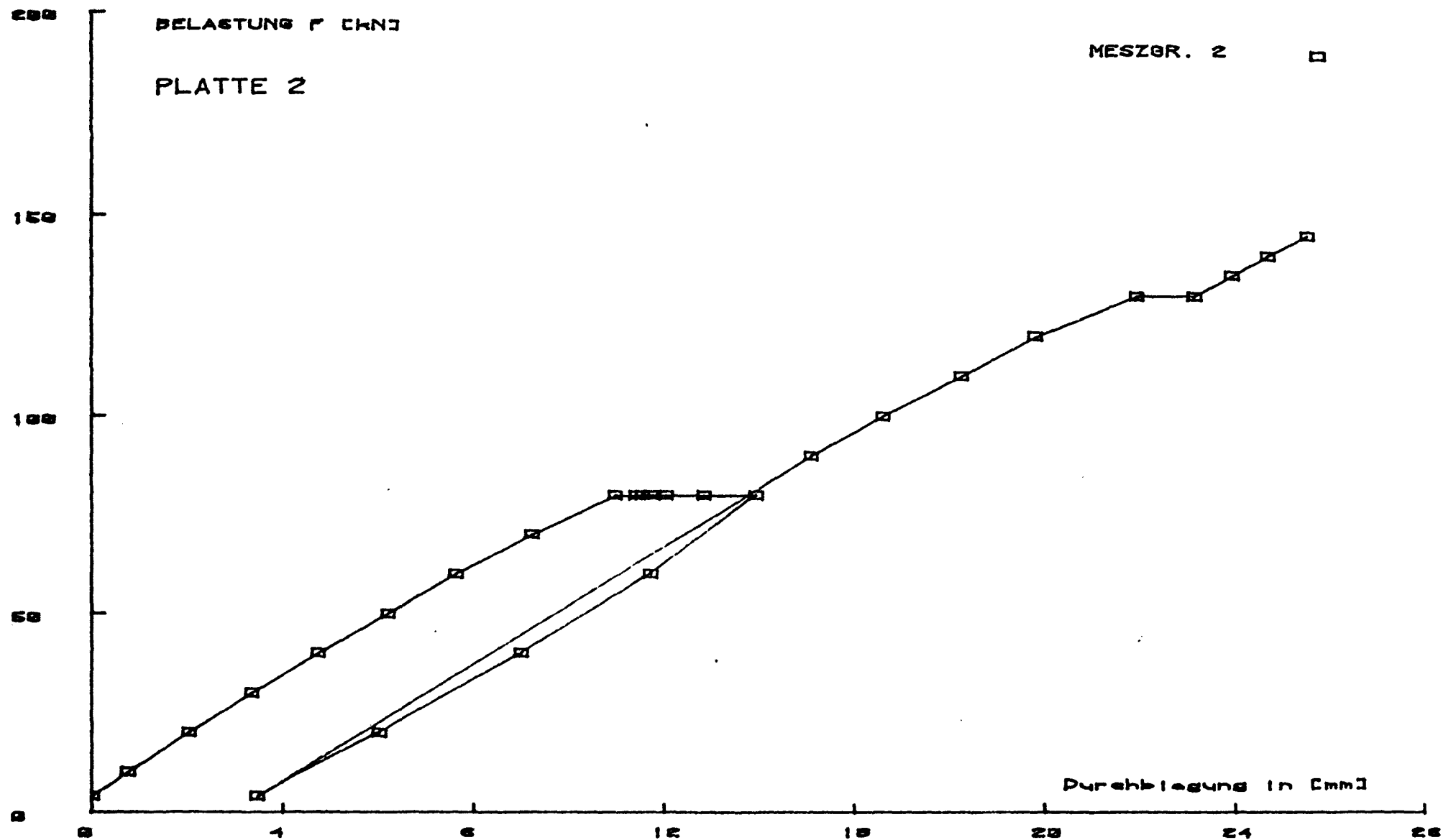


Bild 7.1.2: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung  
bei Platte 2

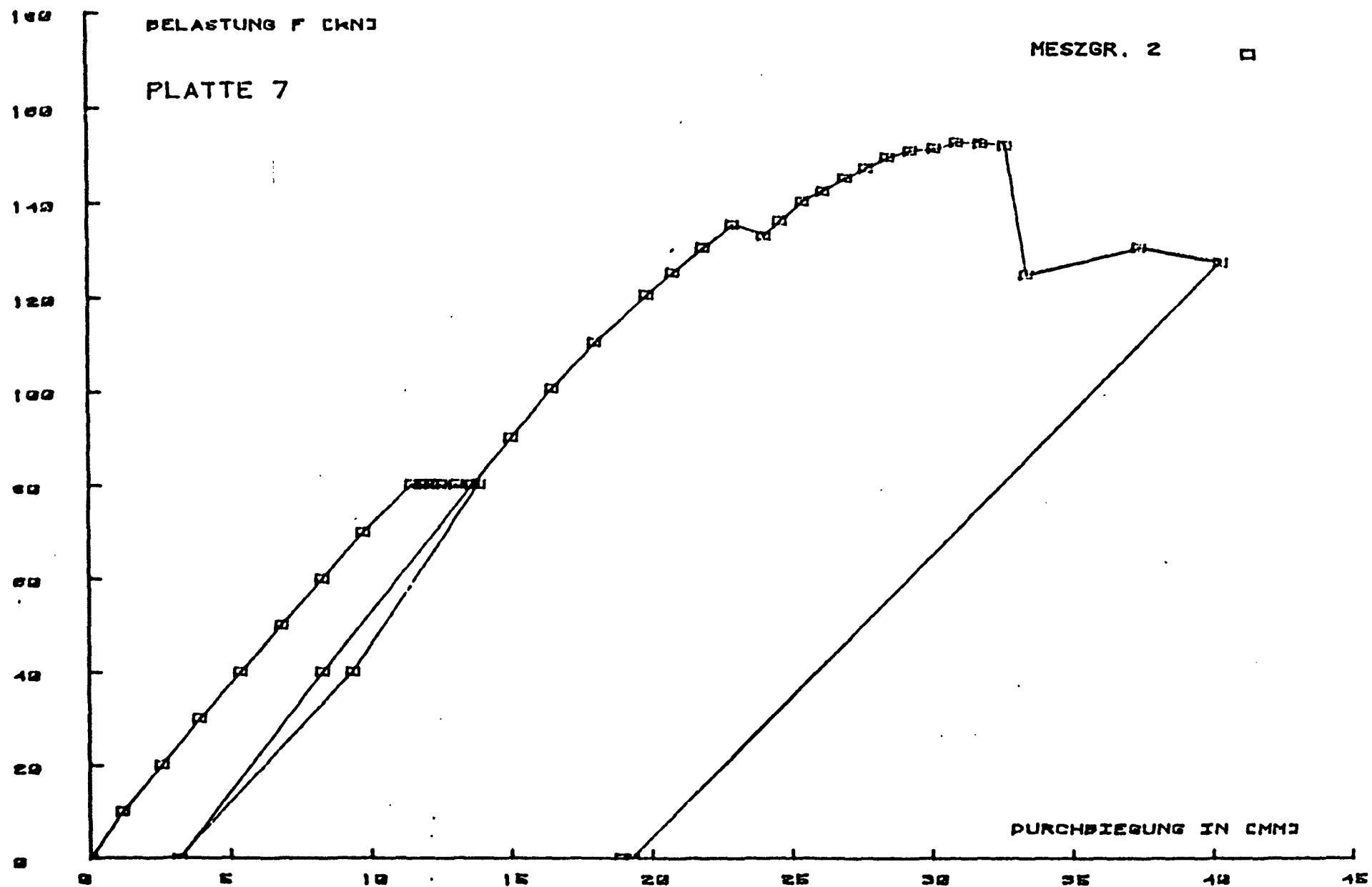


Bild 7.1.3: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung  
bei Platte 7

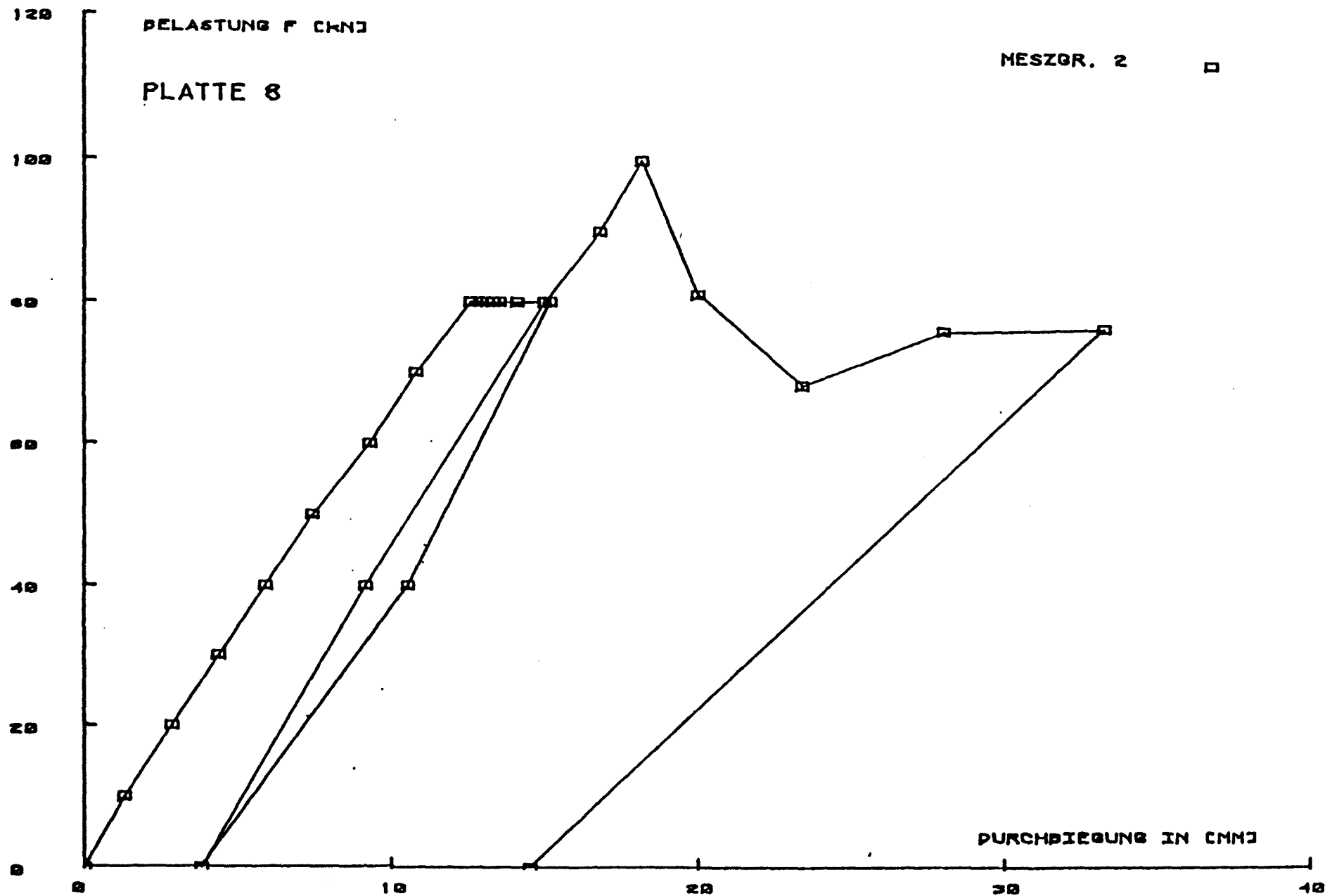


Bild 7.1.4: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 8

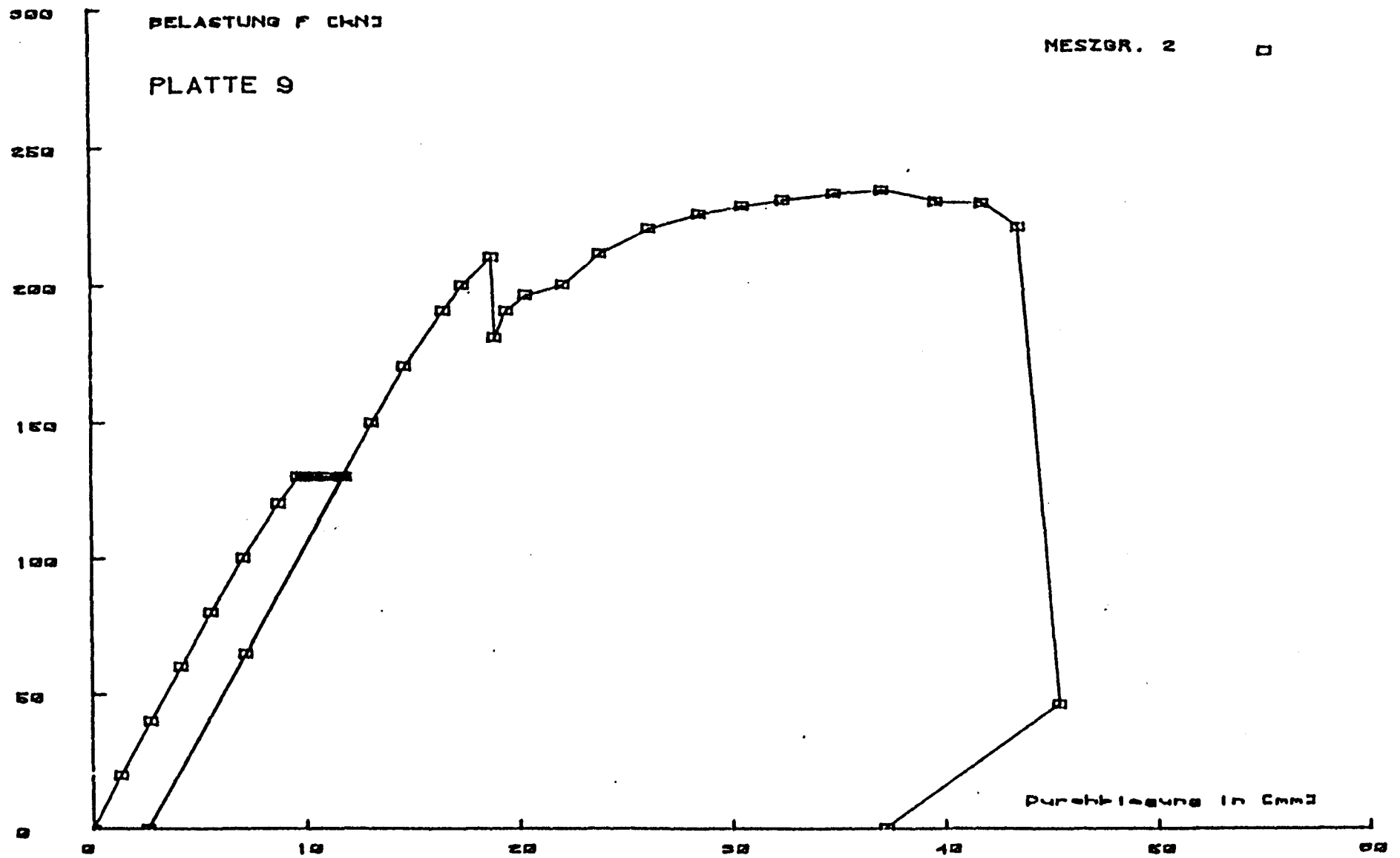


Bild 7.1.5: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung  
bei Platte 9

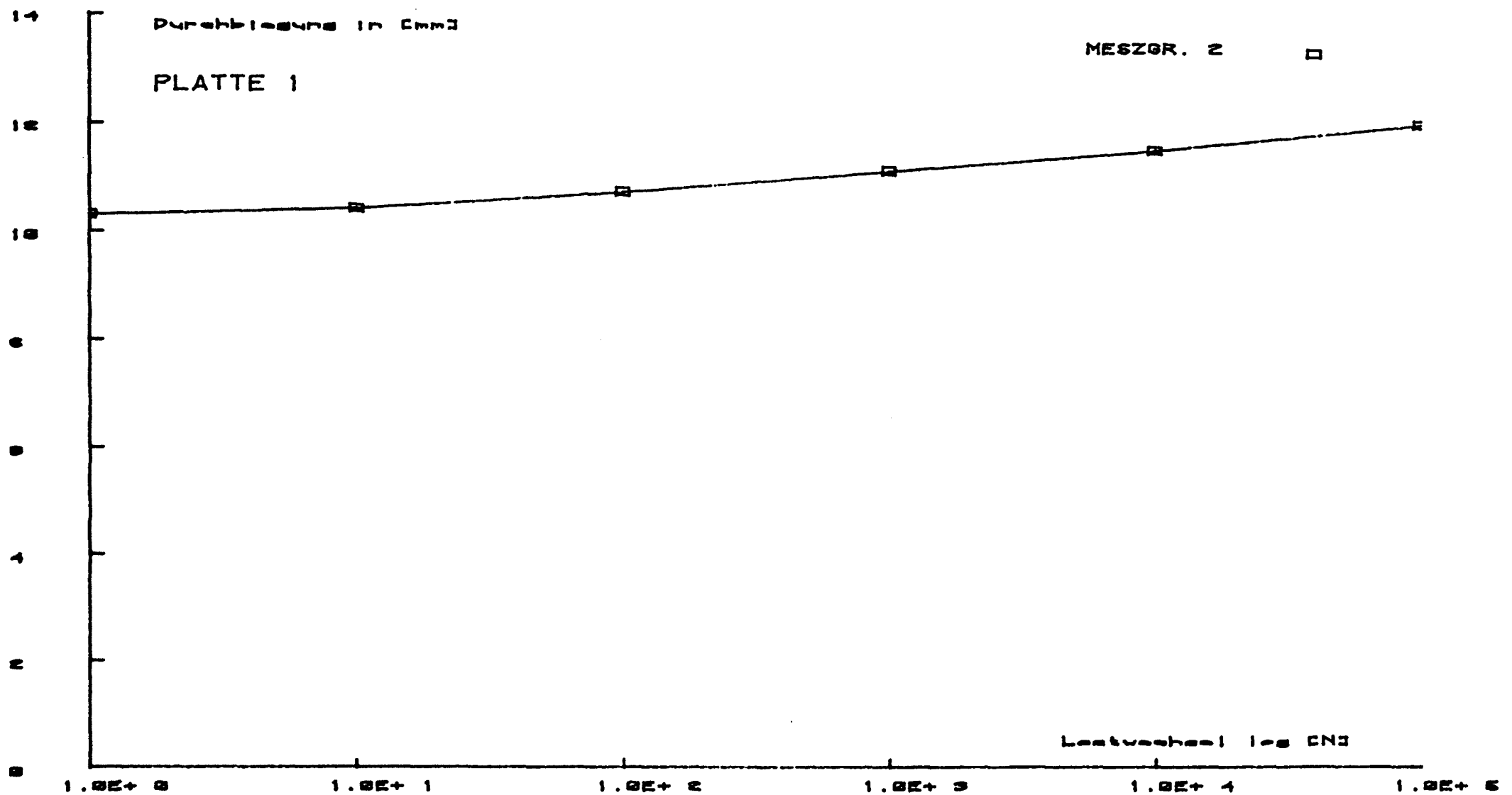


Bild 7.2.1: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 1

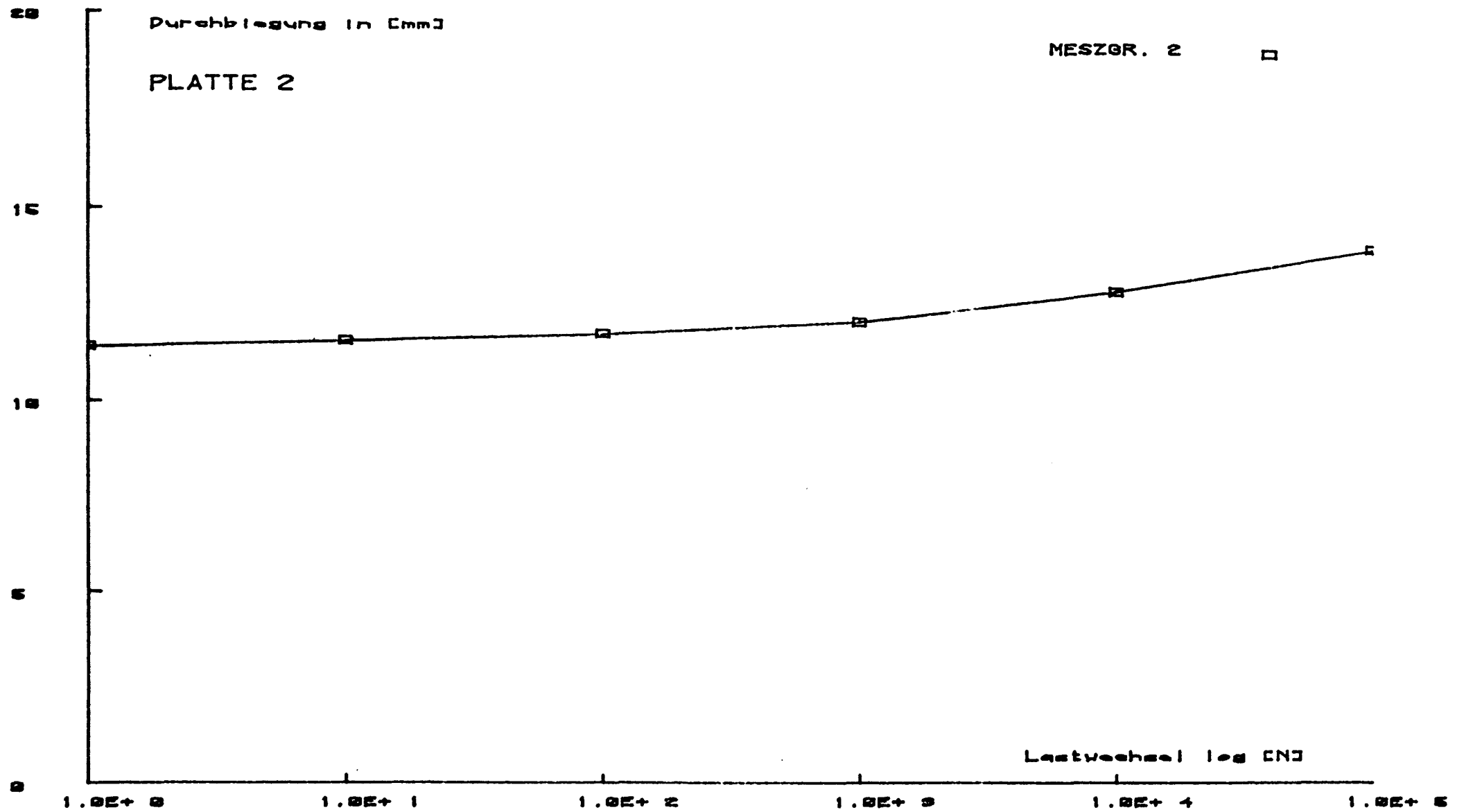


Bild 7.2.2: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 2

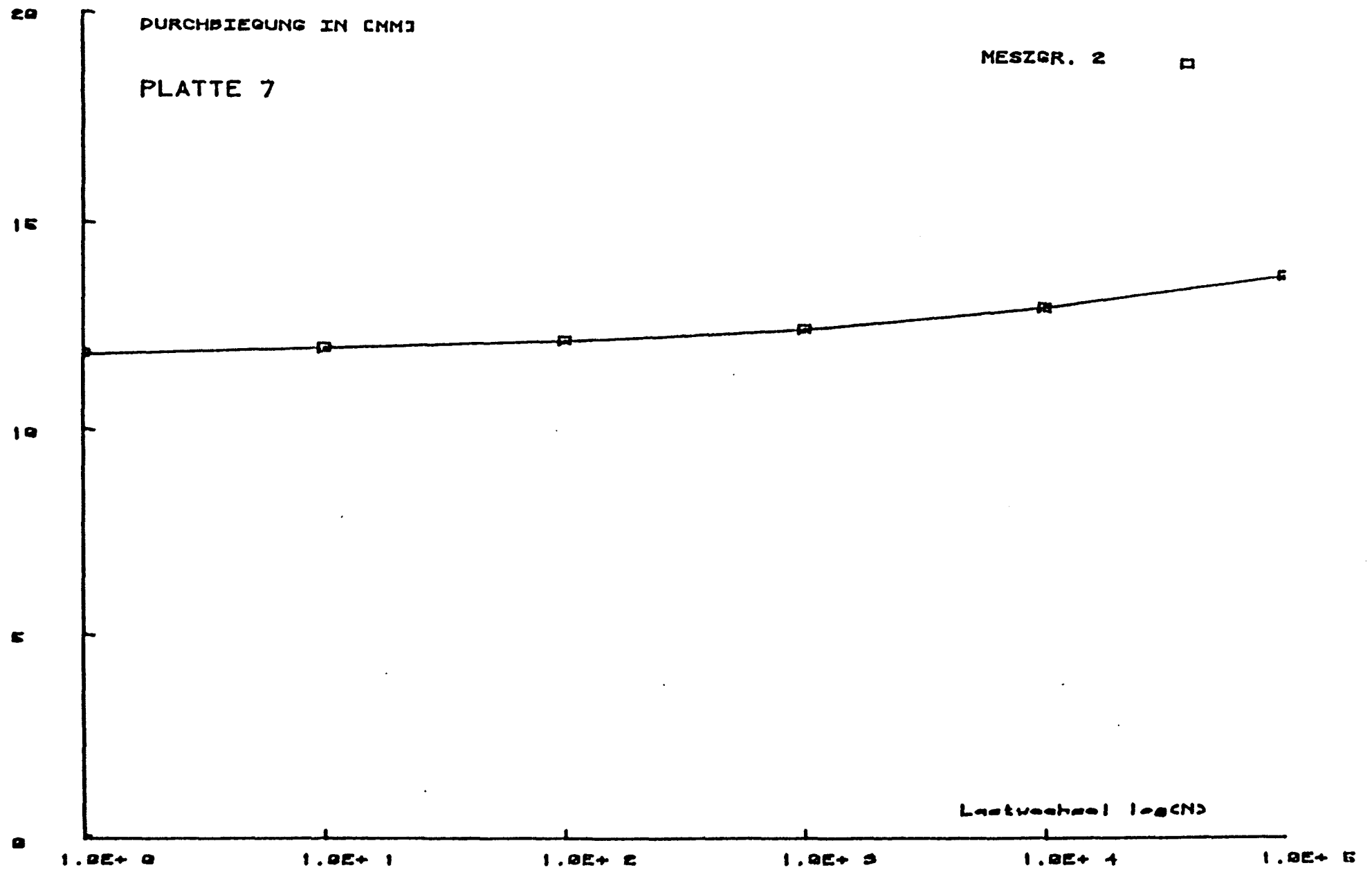


Bild 7.2.3: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 7



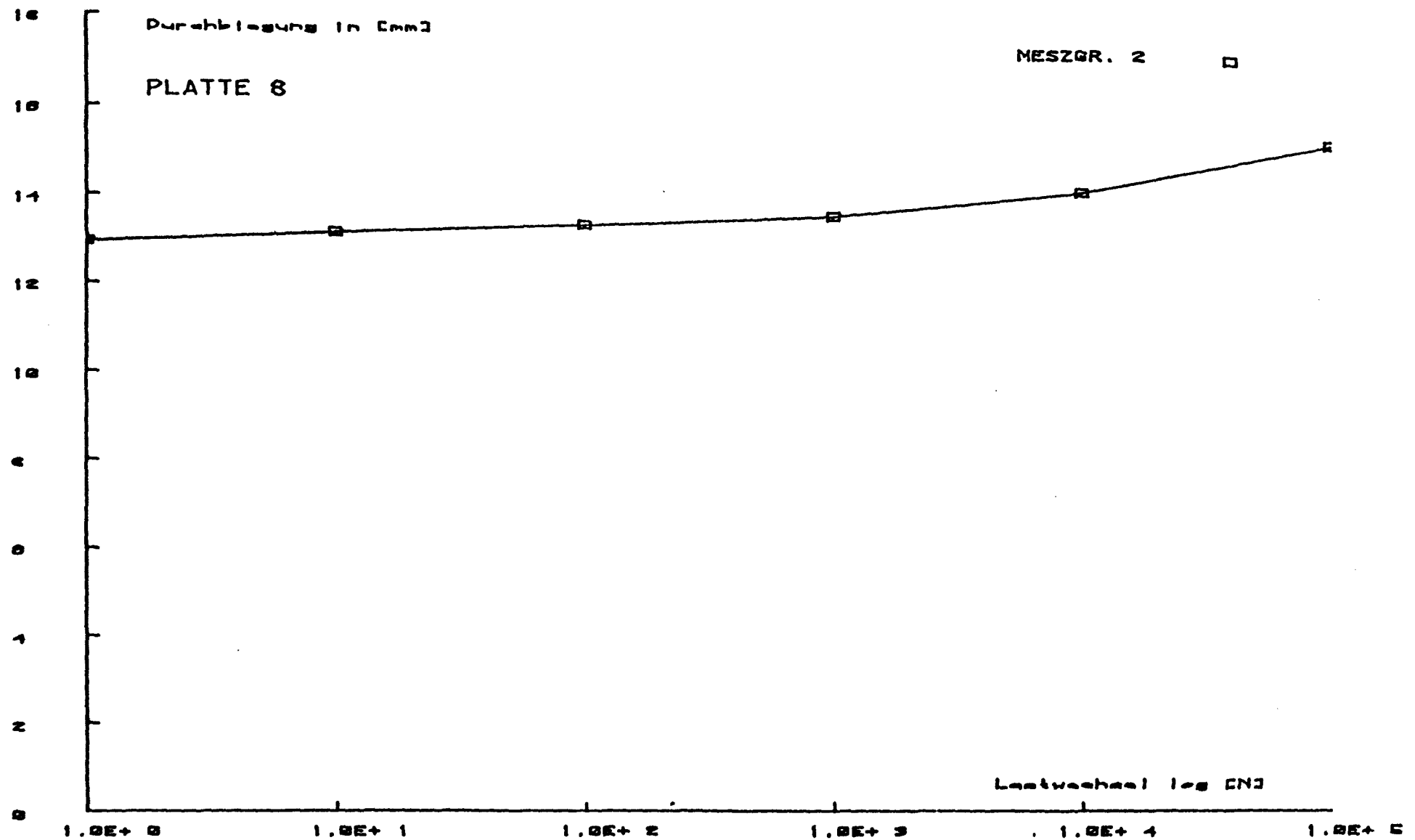


Bild 7.2.4: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 8

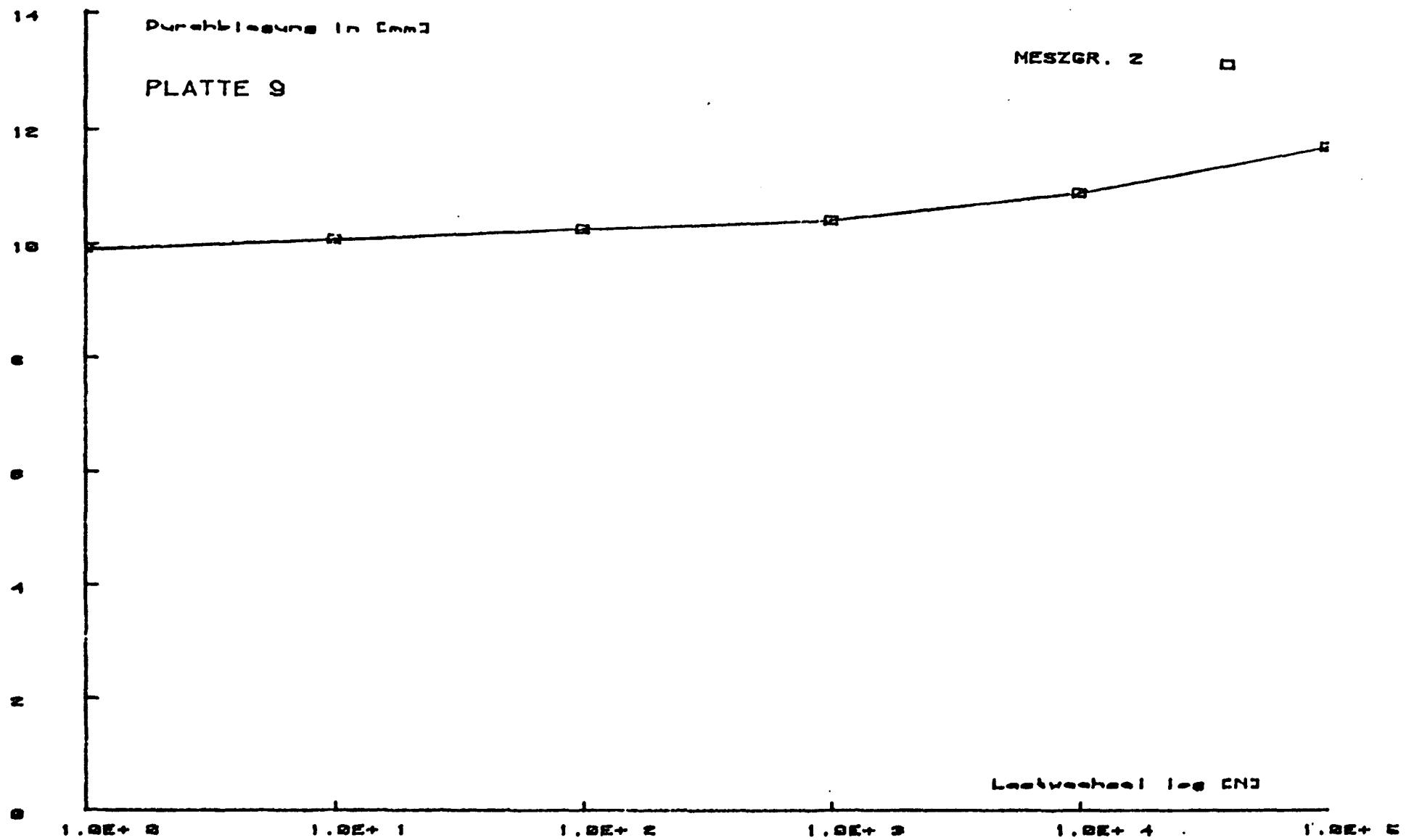


Bild 7.2.5: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 9

# Platte 1

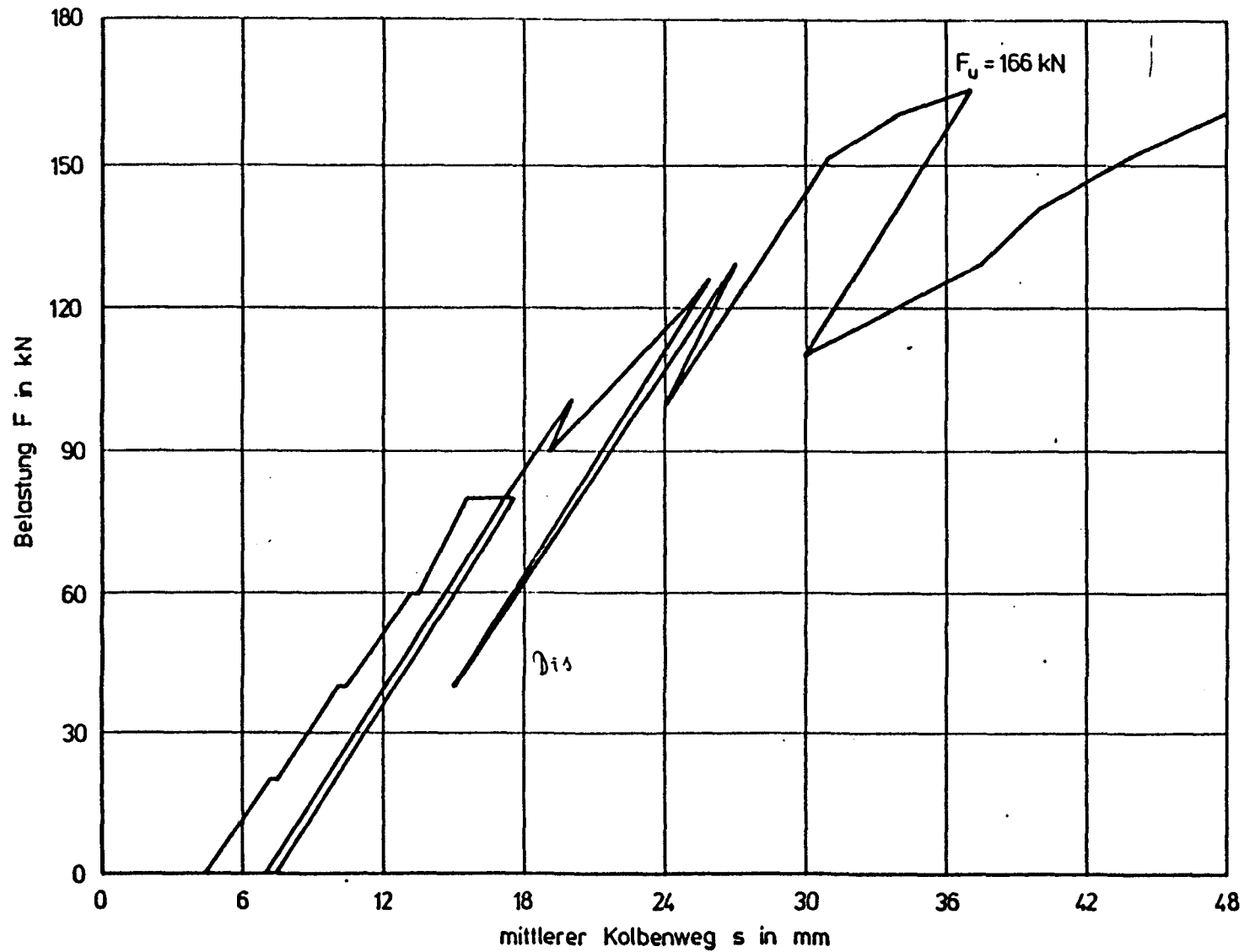


Bild 7.3.1: Kolbenweg in Abhängigkeit von der Last bei Platte 1

## Platte 2

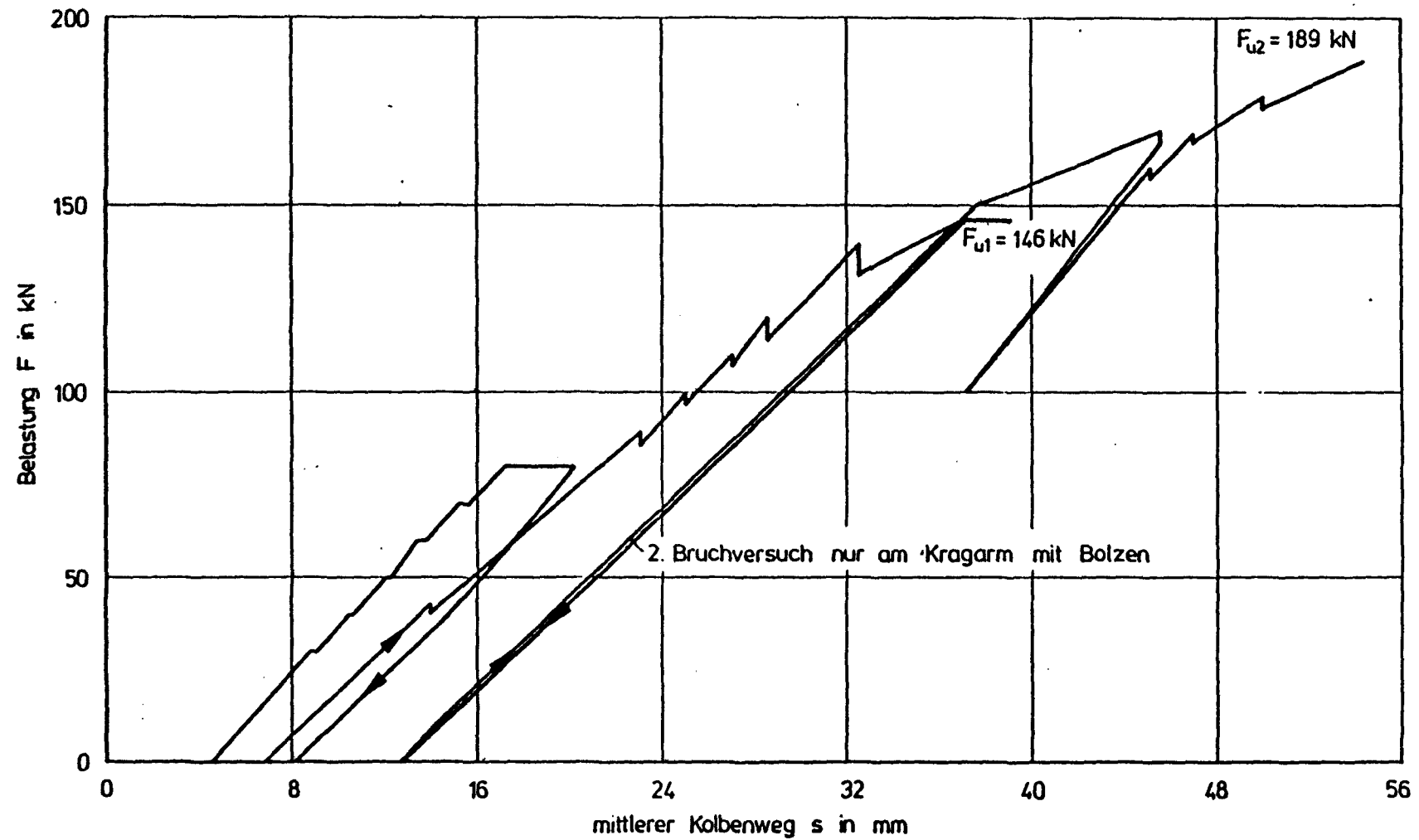


Bild 7.3.2: Kolbenweg in Abhängigkeit von der Last bei Platte 2

## Platte 7

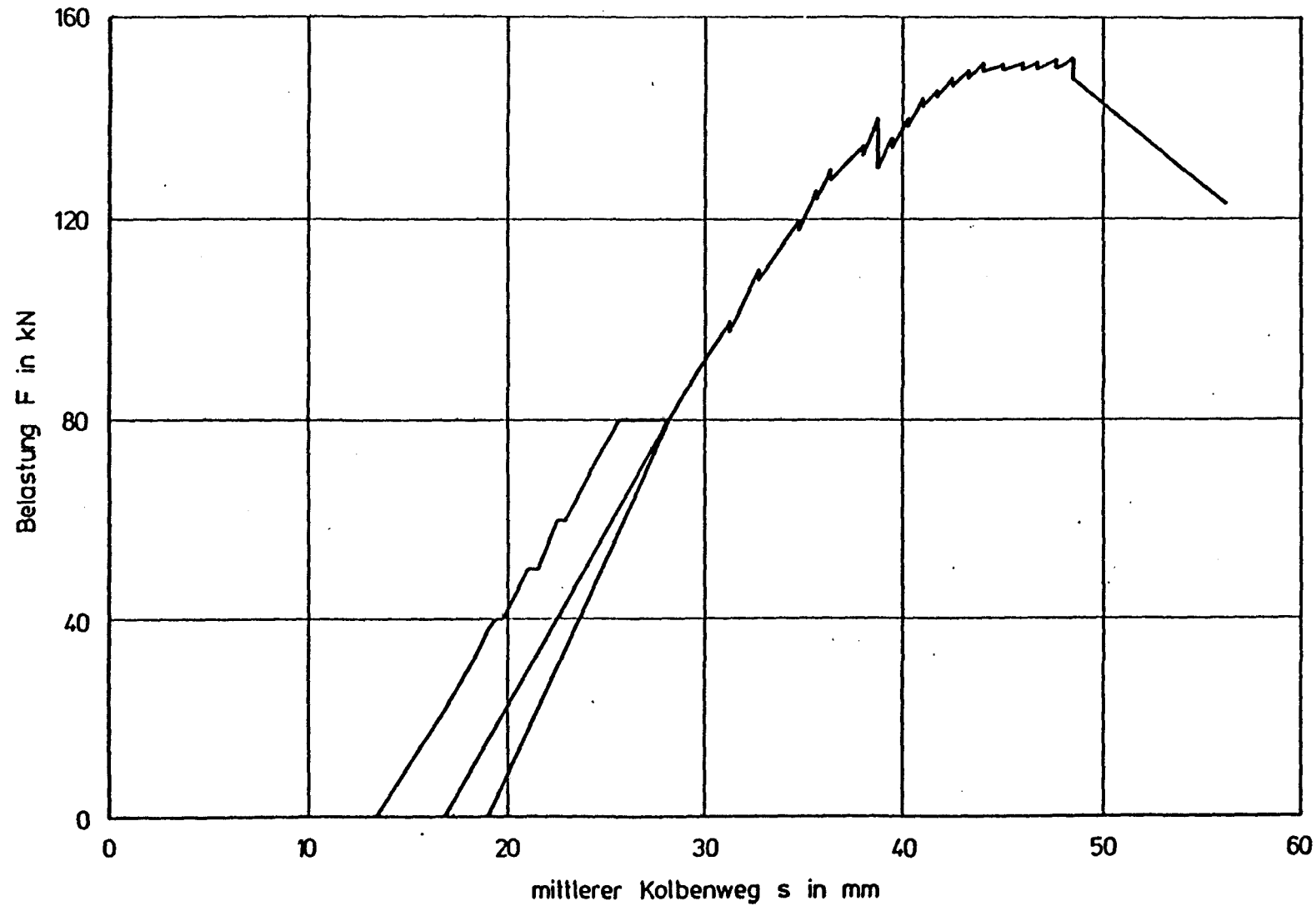


Bild 7.3.3: Kolbenweg in Abhängigkeit von der Last bei  
Platte 7

## Platte 8

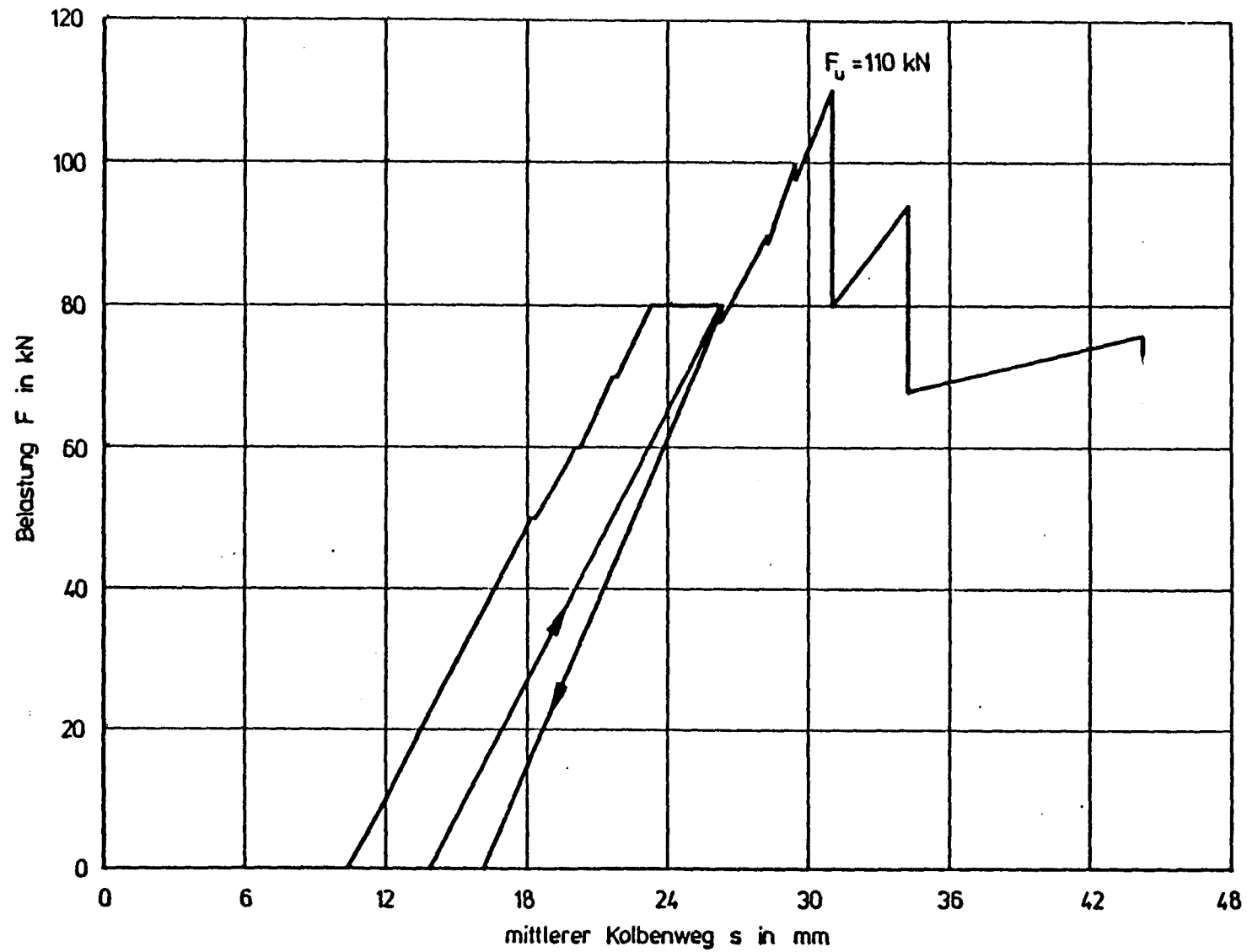


Bild 7.3.4: Kolbenweg in Abhängigkeit von der Last bei  
Platte 8

## Platte 9

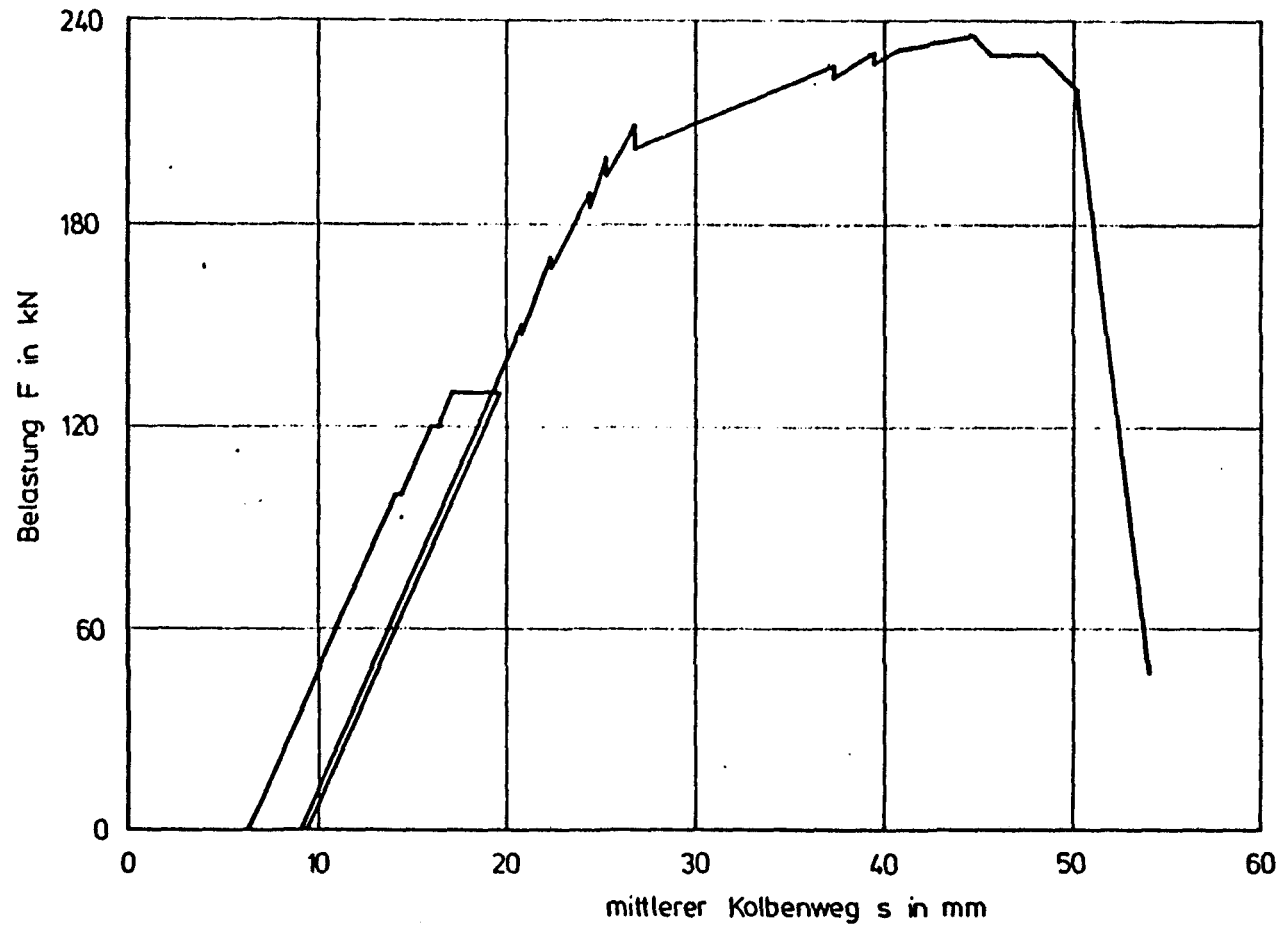
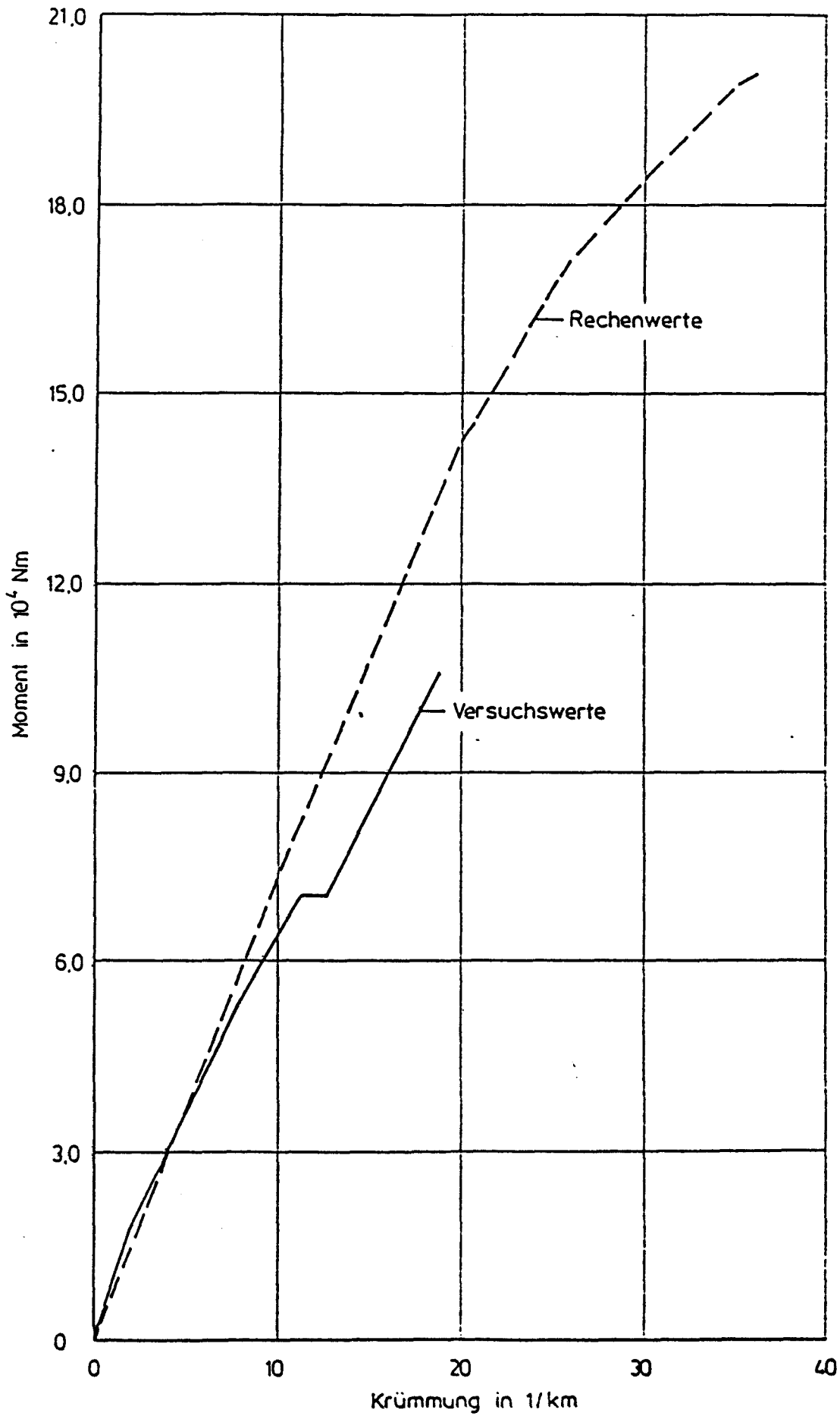


Bild 7.3.5: Kolbenweg in Abhängigkeit von der Last bei Platte 9

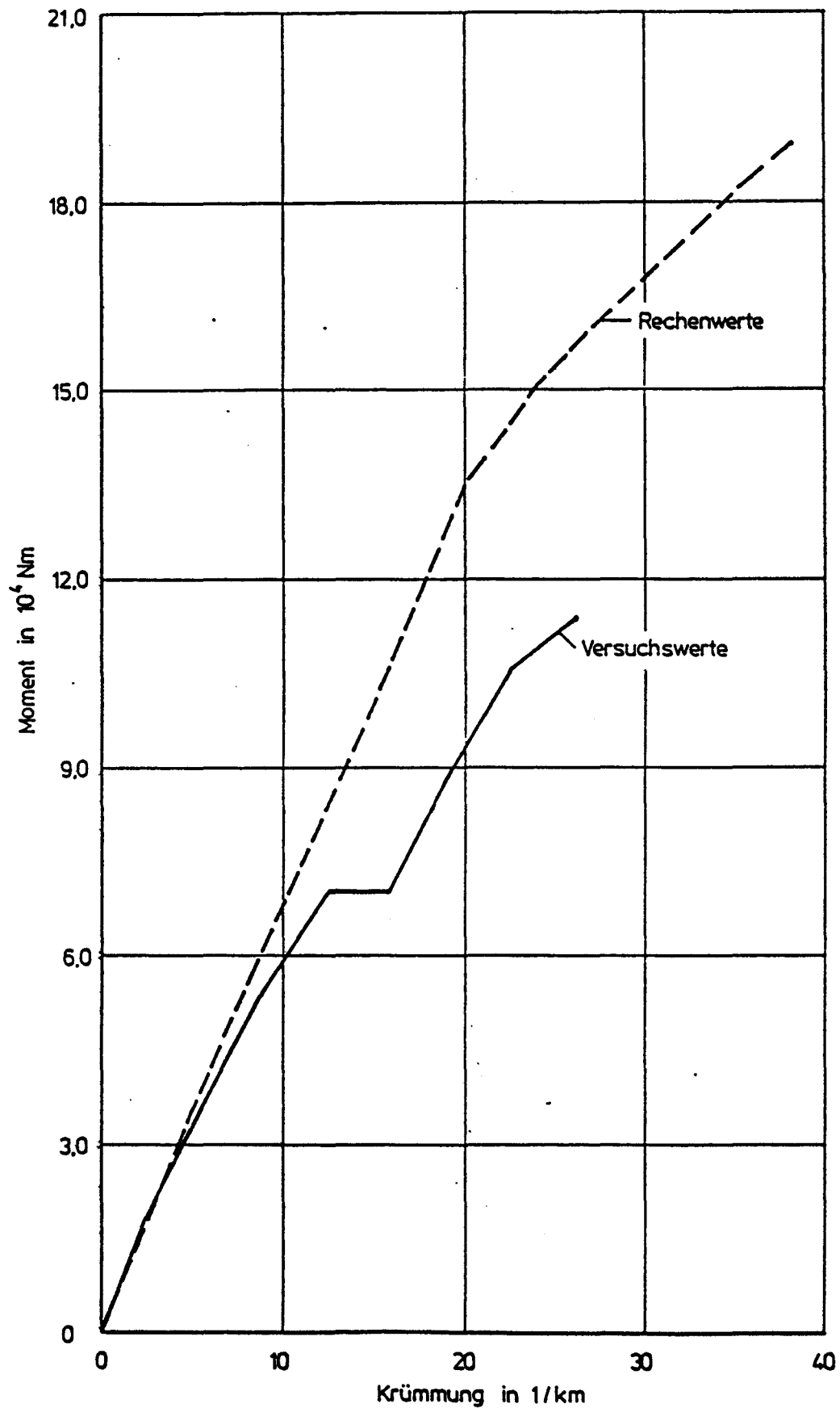
# Platte 1



**Bild 7.4.1: Rechnerische und gemessene Momenten-Krümmungs-**  
 linie von Platte 1

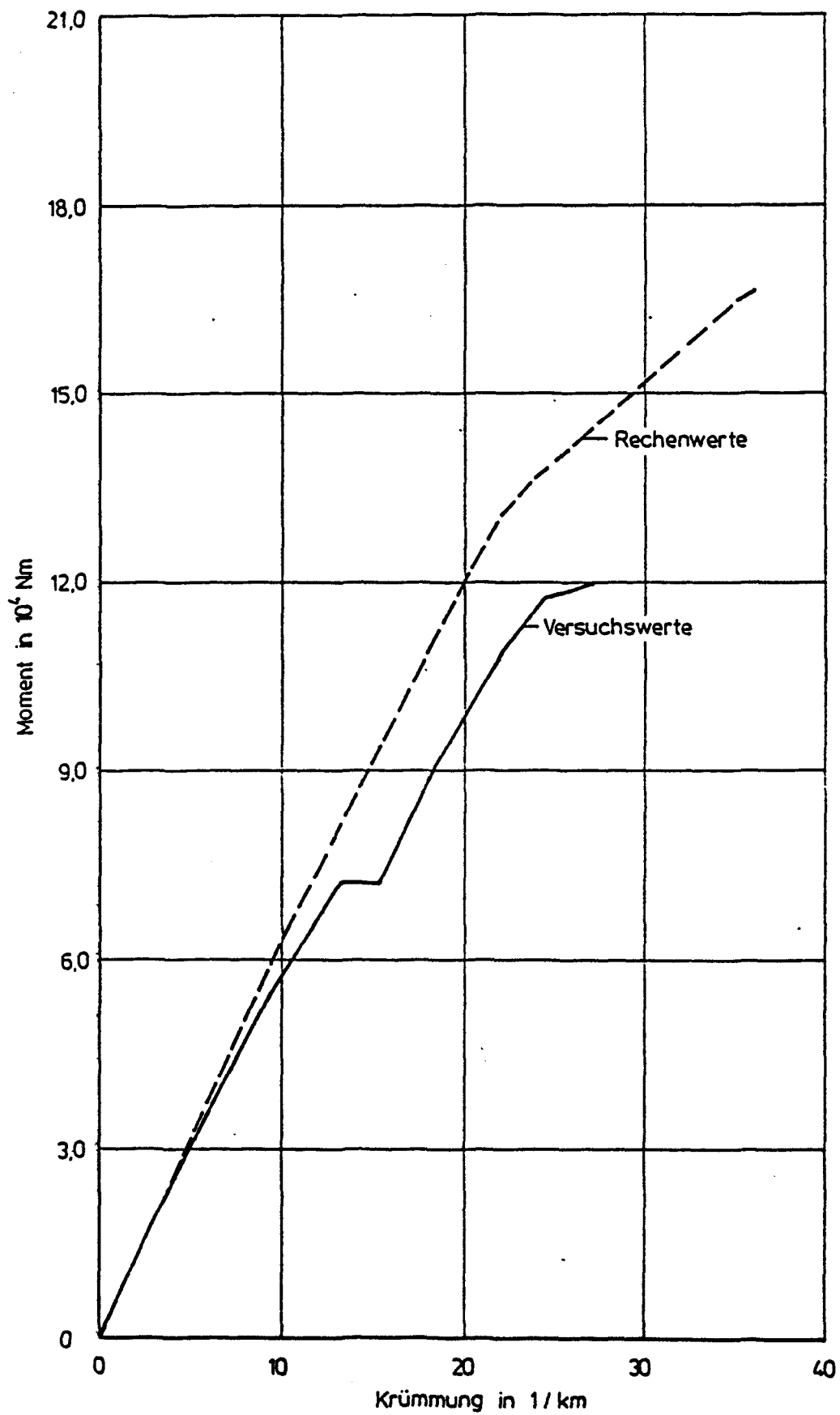


## Platte 2



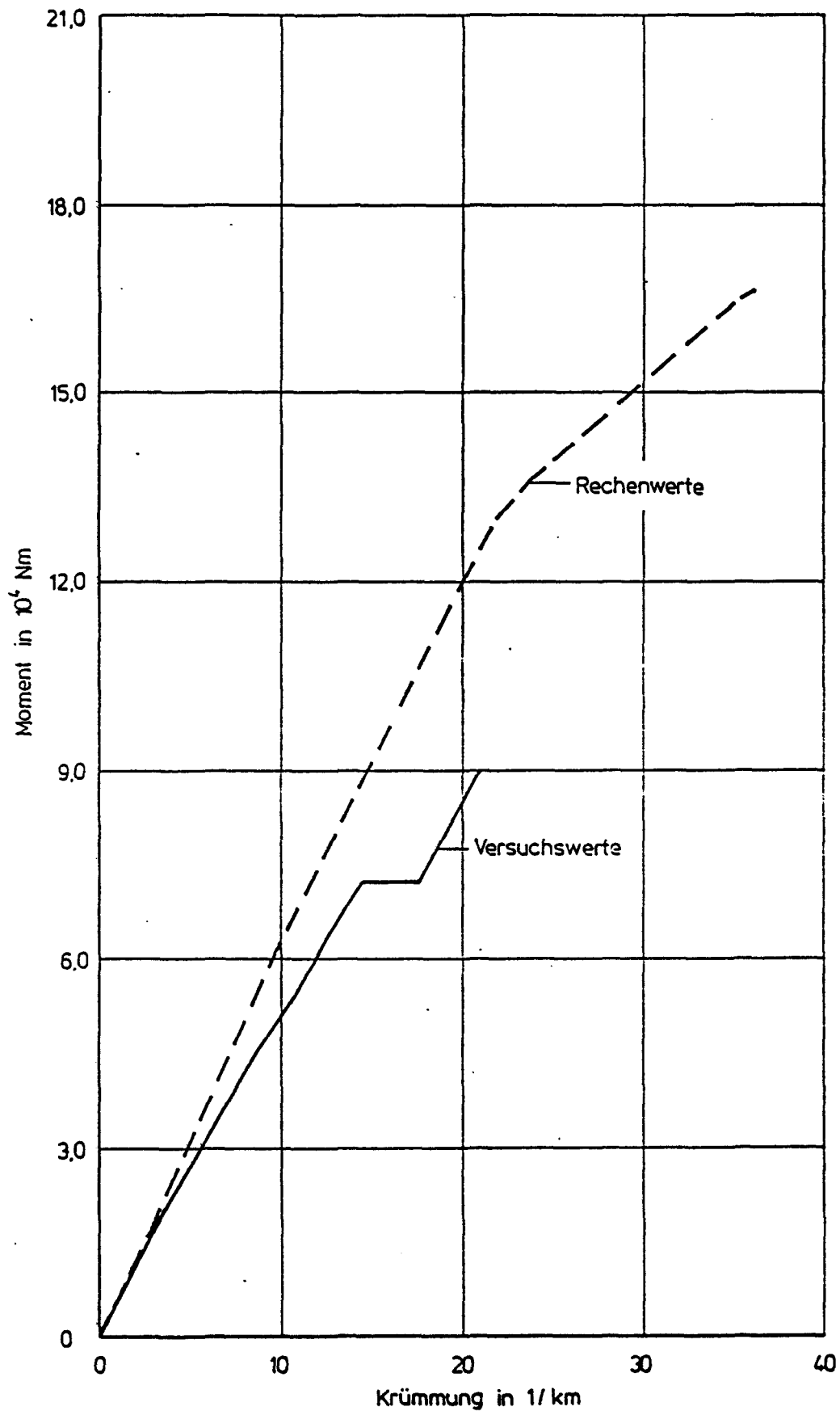
**Bild 7.4.2: Rechnerische und gemessene Momenten-Krümmungs-  
linie von Platte 2**

## Platte 7



**Bild 7.4.3: Rechnerische und gemessene Momenten-Krümmungs-  
Linie von Platte 7**

## Platte 8



**Bild 7.4.4:** Rechnerische und gemessene Momenten-Krümmungs-  
linie von Platte 8

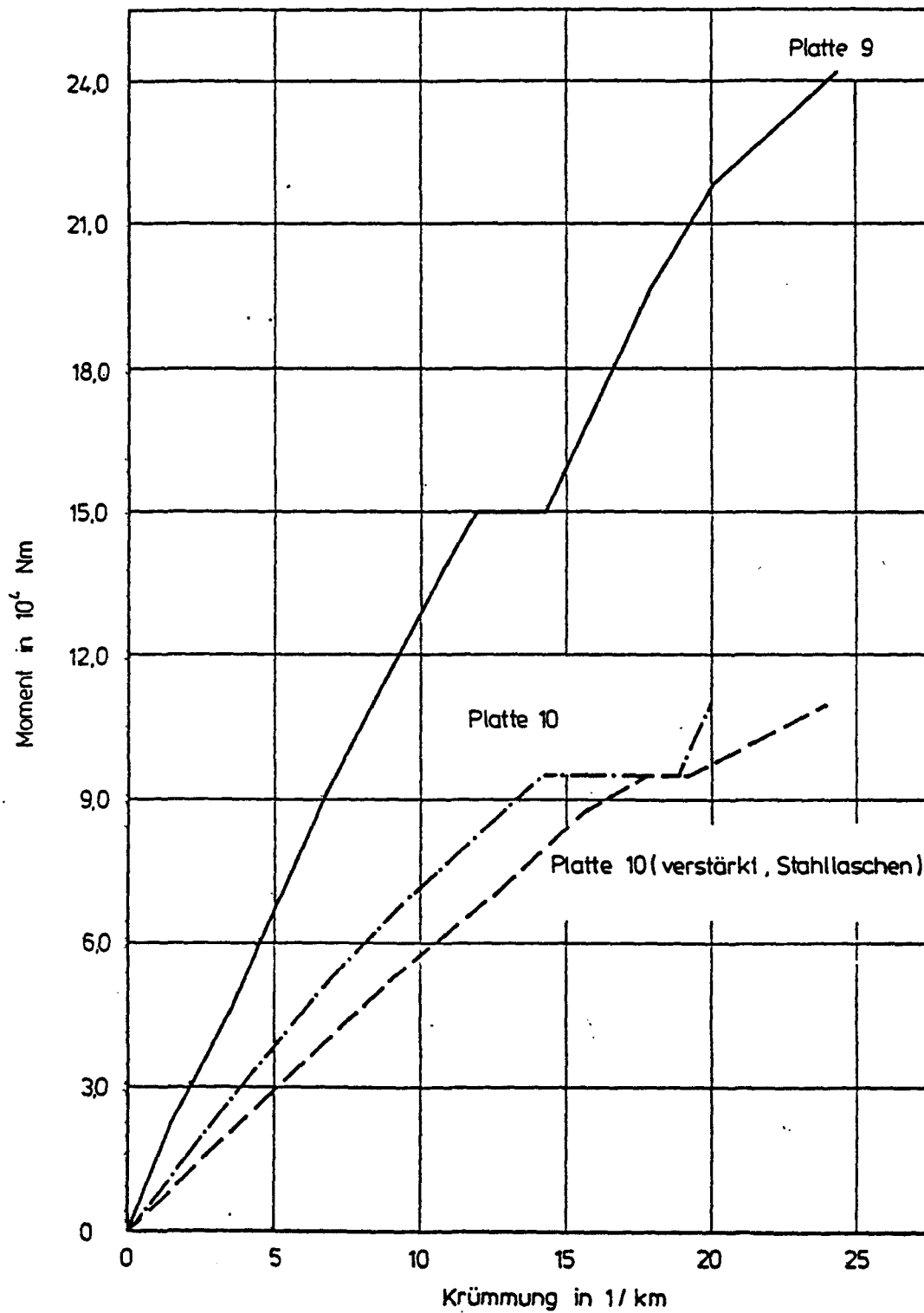


Bild 7.4.5: Gemessene Momenten-Krümmungslinien von Platte 9, 10 und 10 S

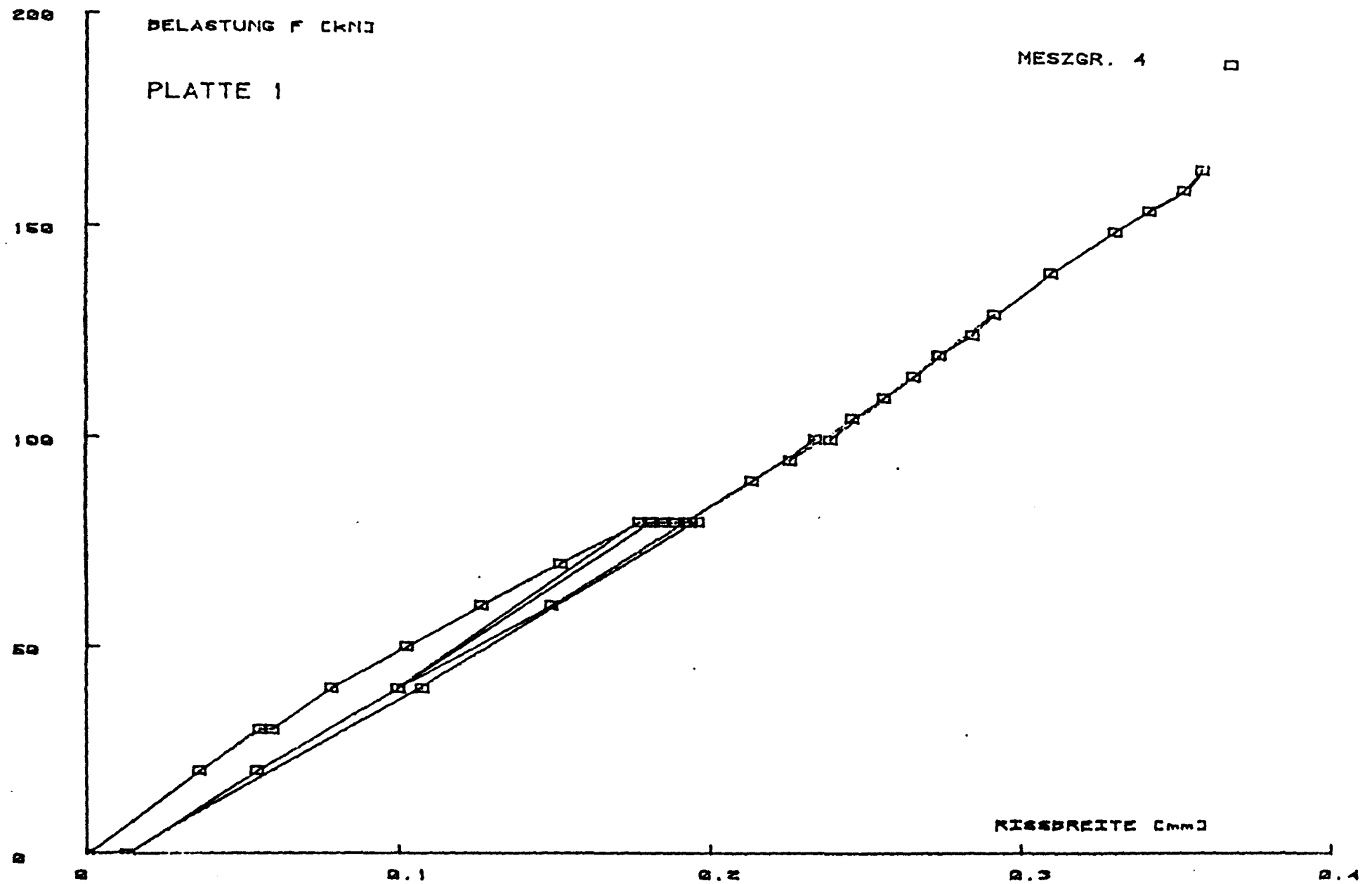


Bild 7.5.1: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 1

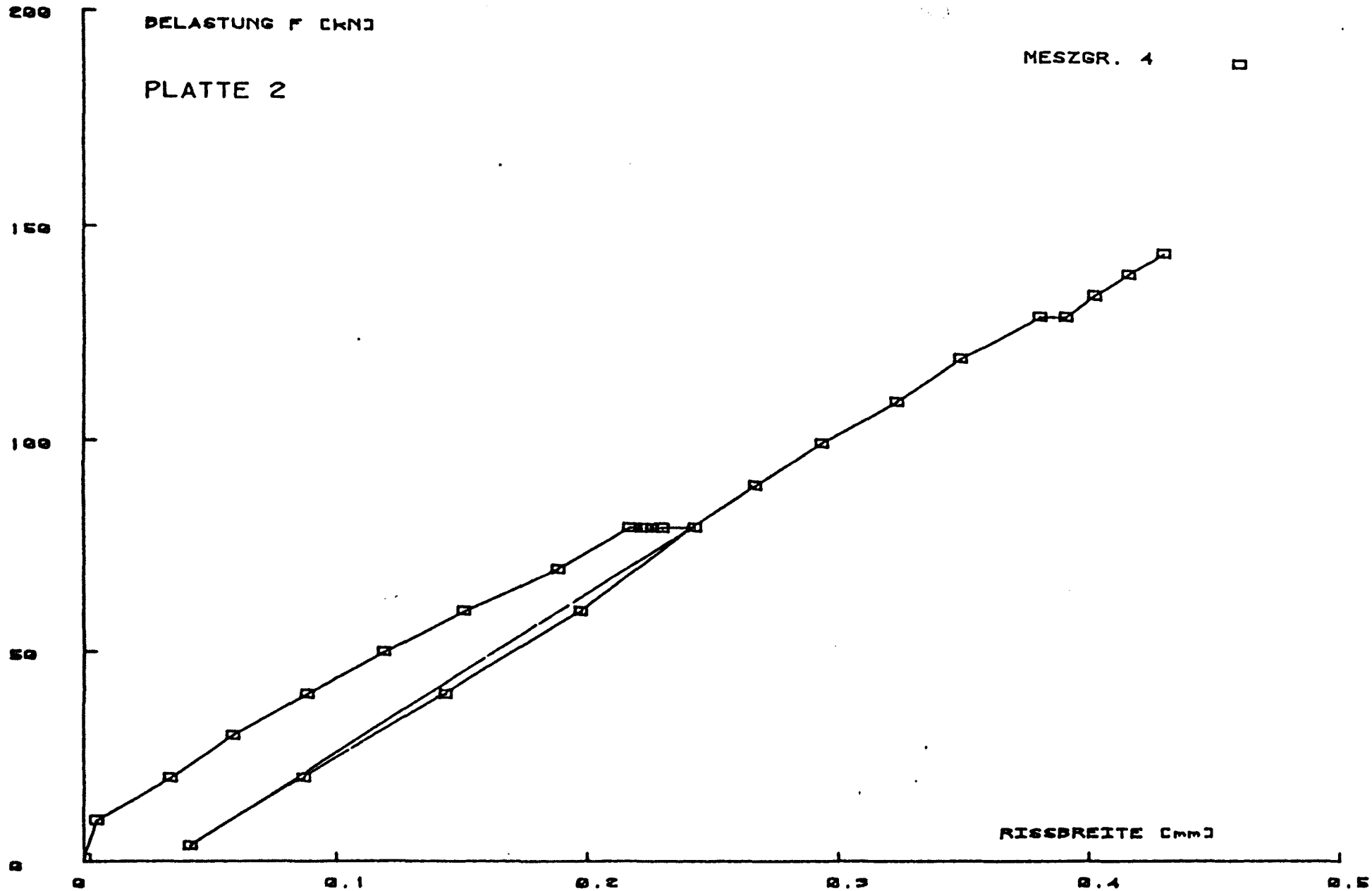


Bild 7.5.2: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 2

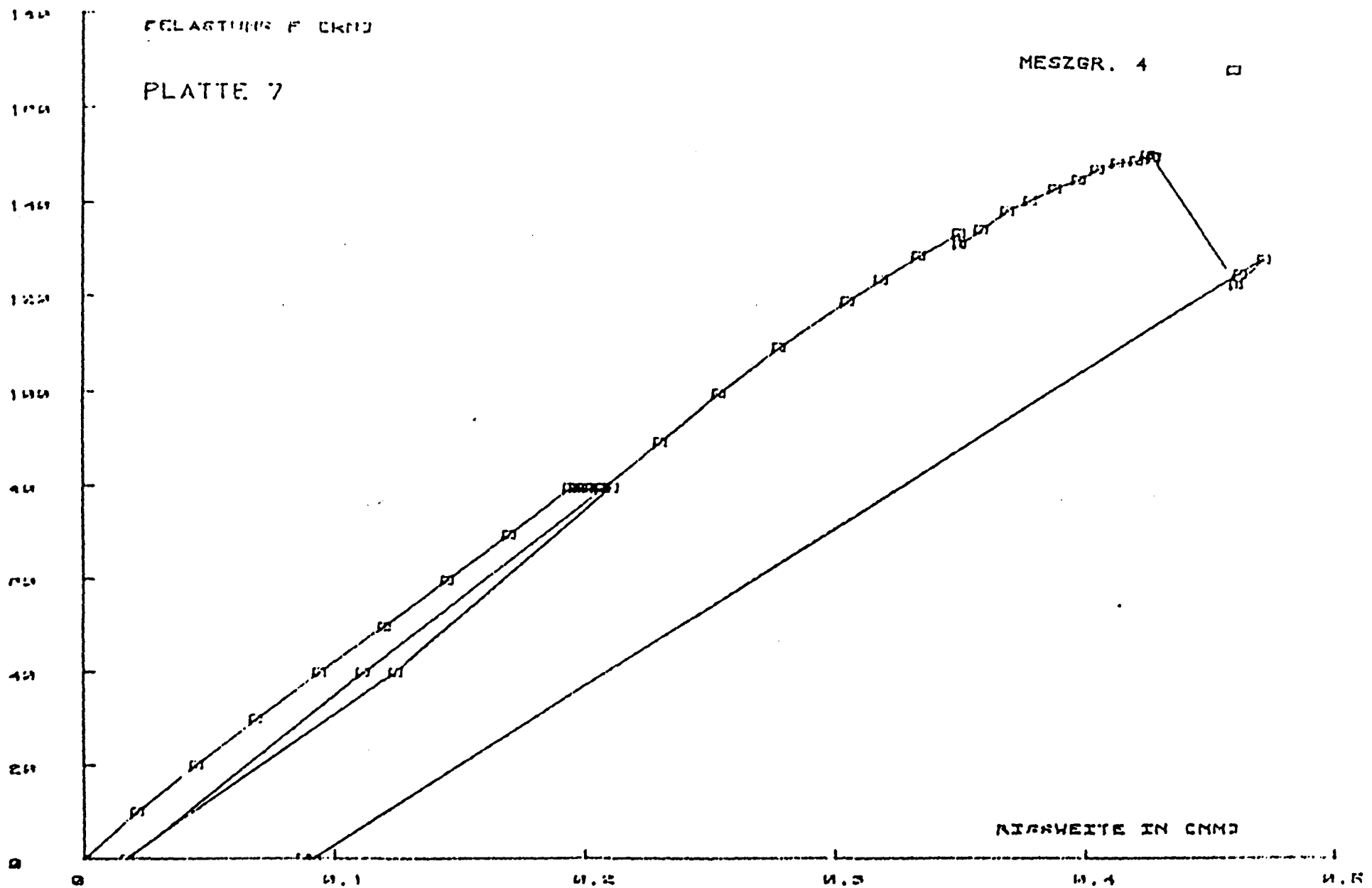


Bild 7.5.3: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 7

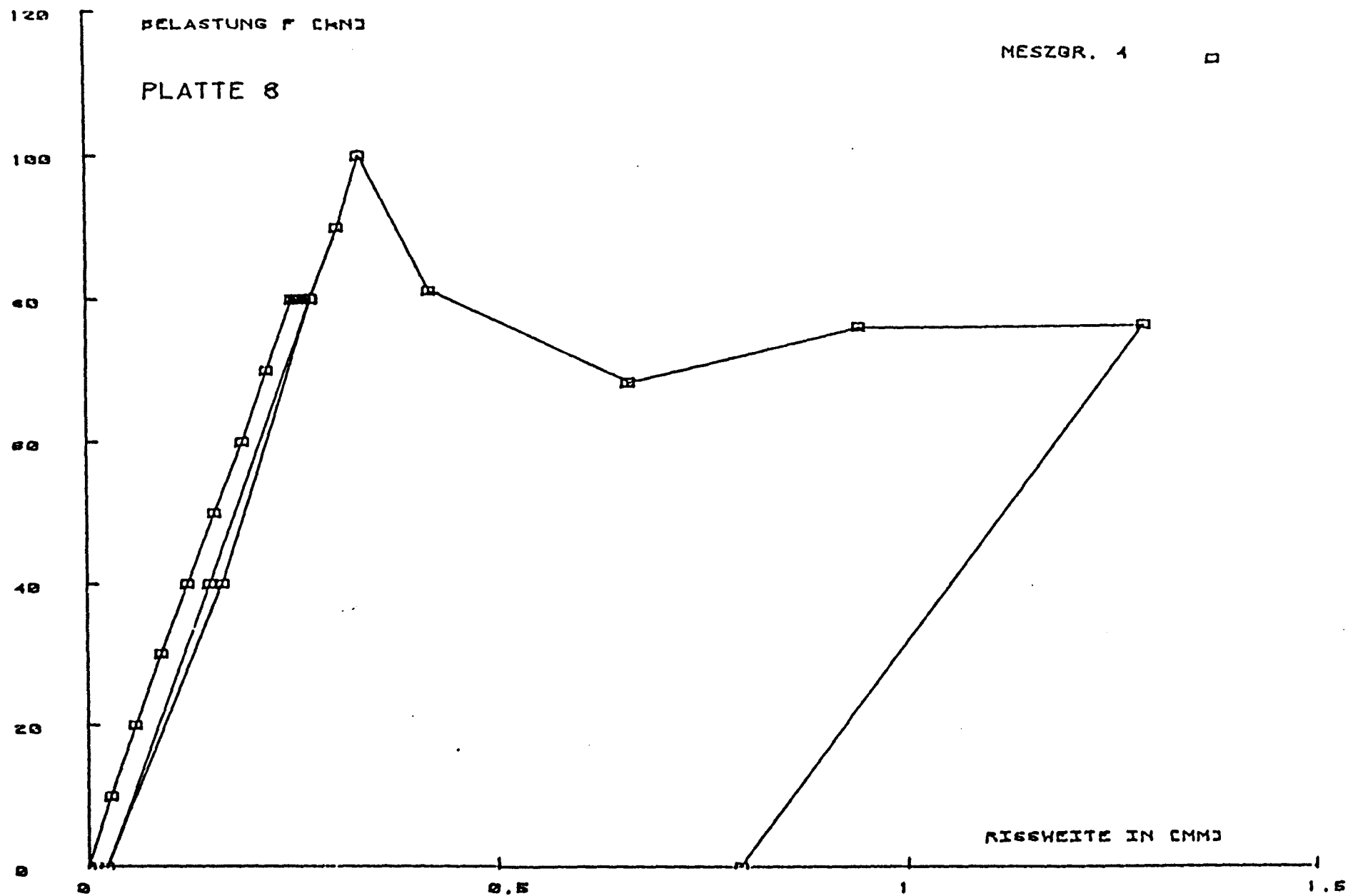


Bild 7.5.4: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 8



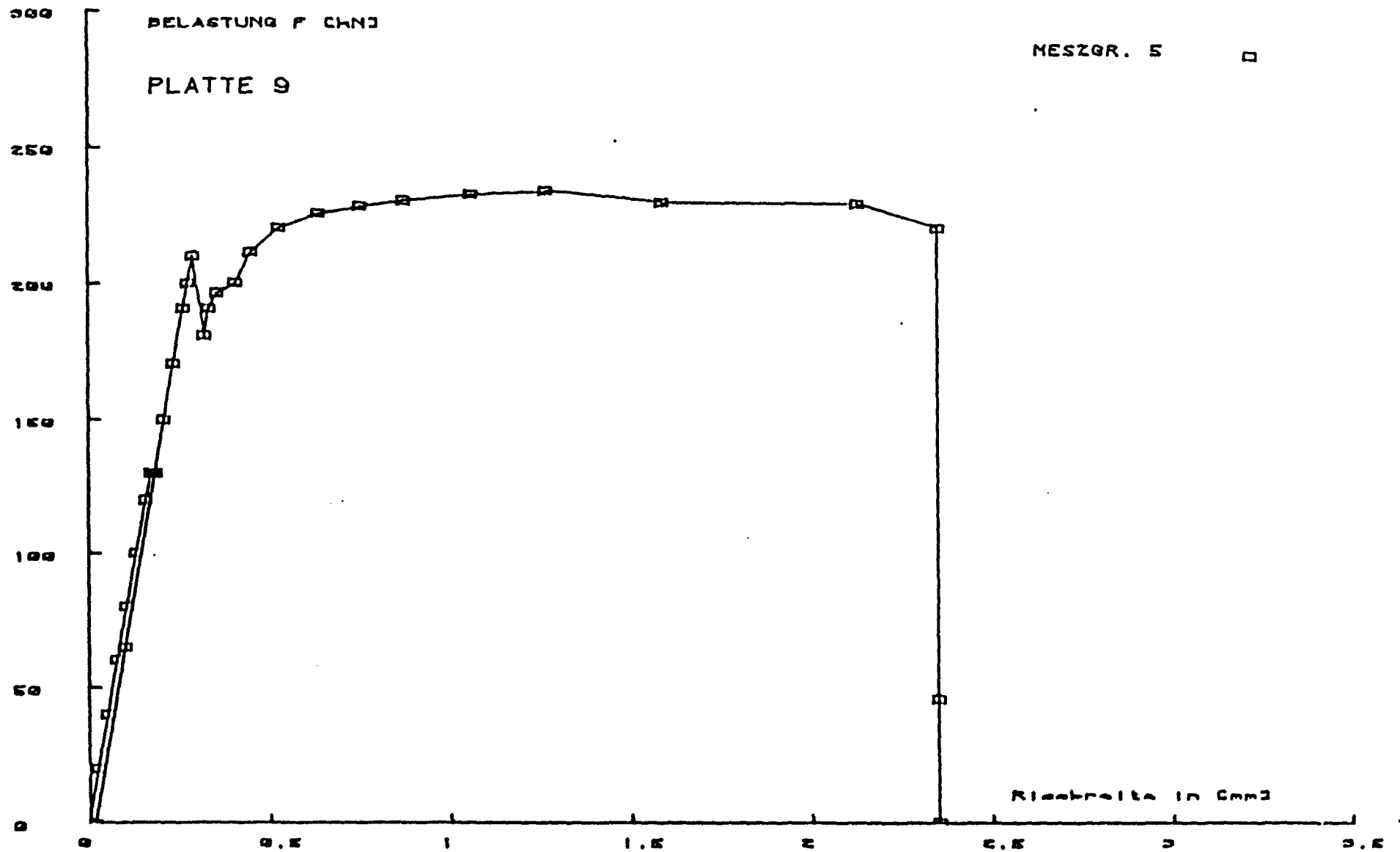


Bild 7.5.5 Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 9

## Platte 1

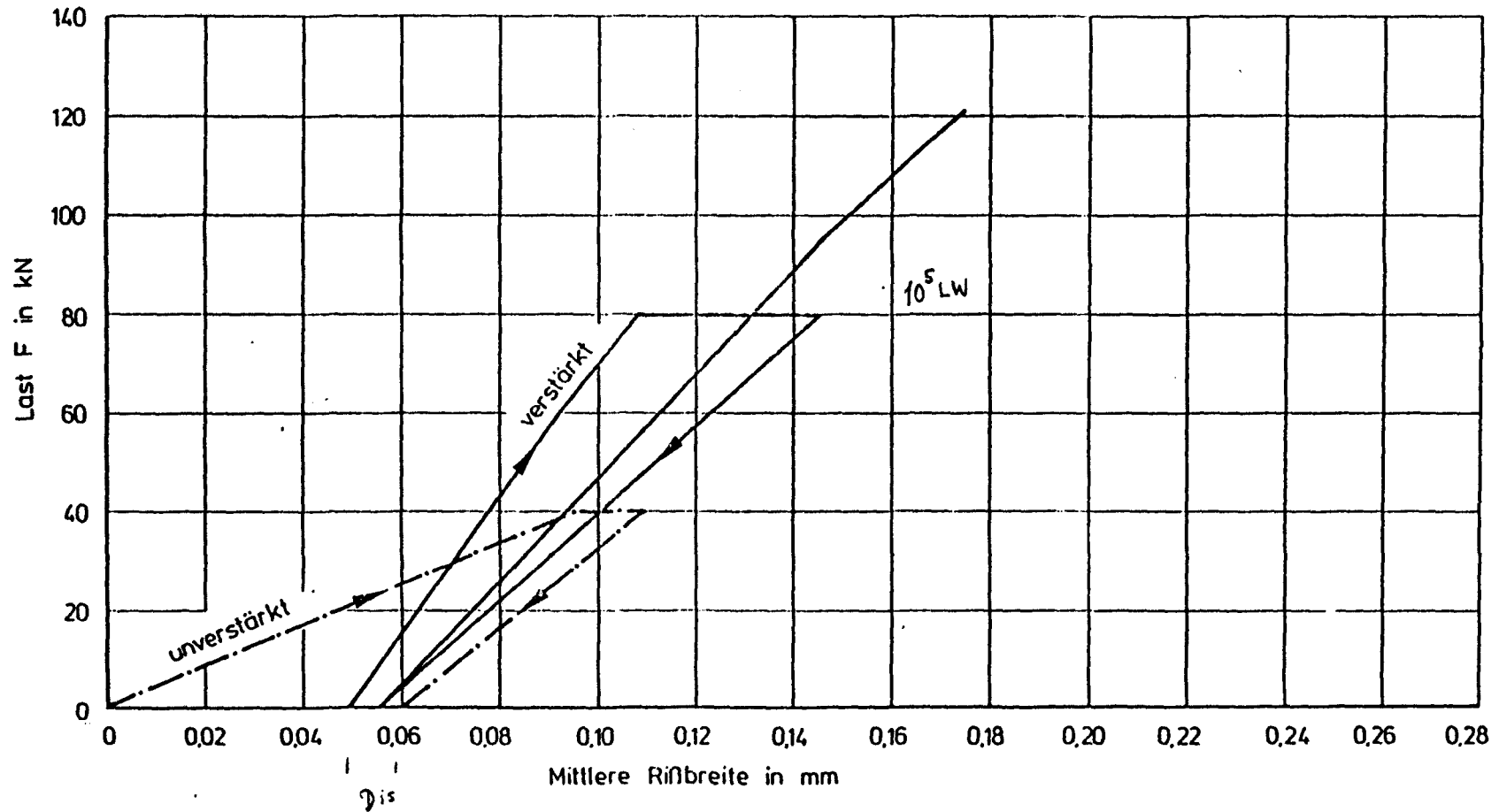


Bild 7.6.1: Mittlere Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 1

## Platte 2

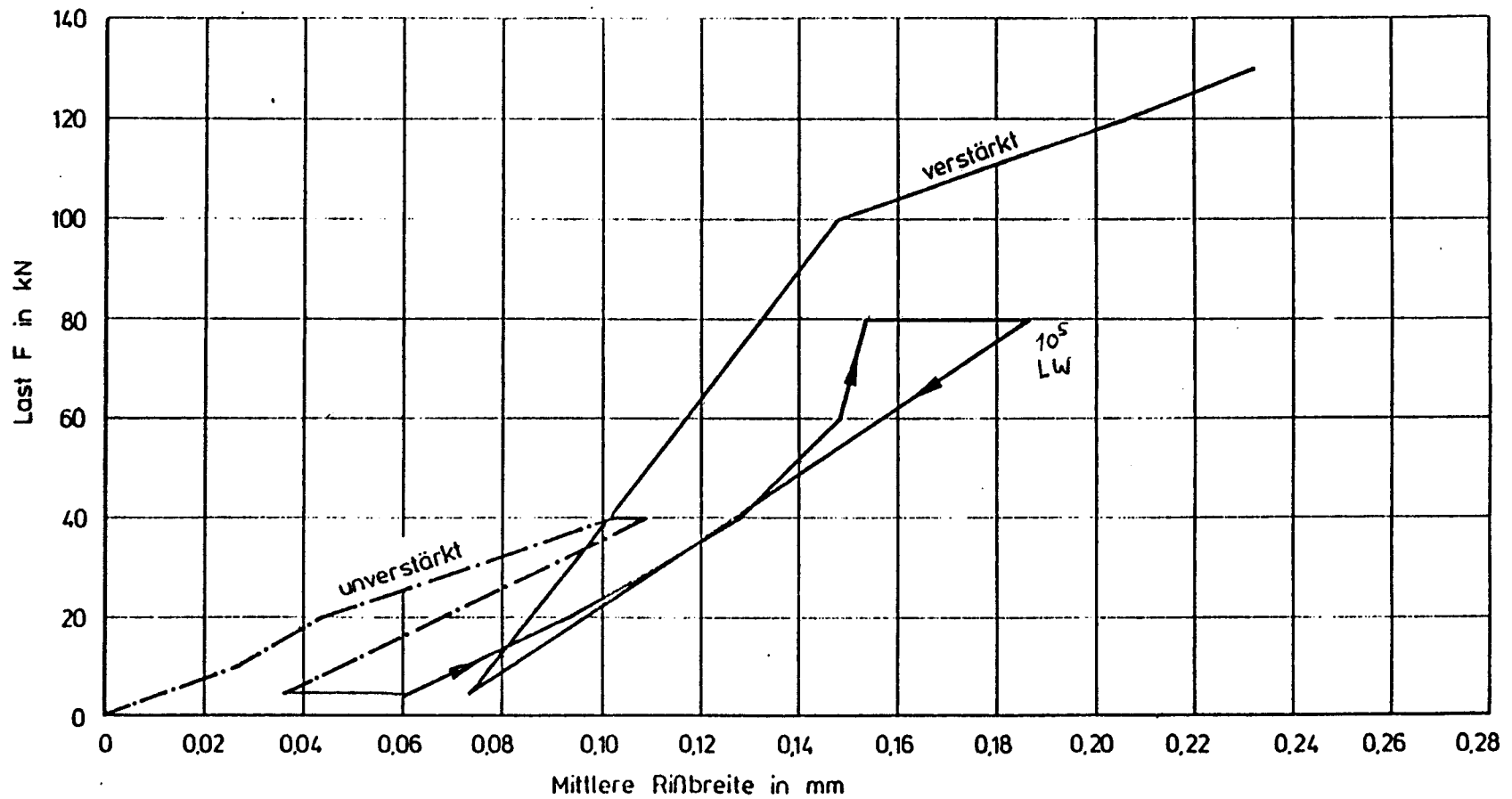


Bild 7.6.2: Mittlere Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 2

## Platte 7

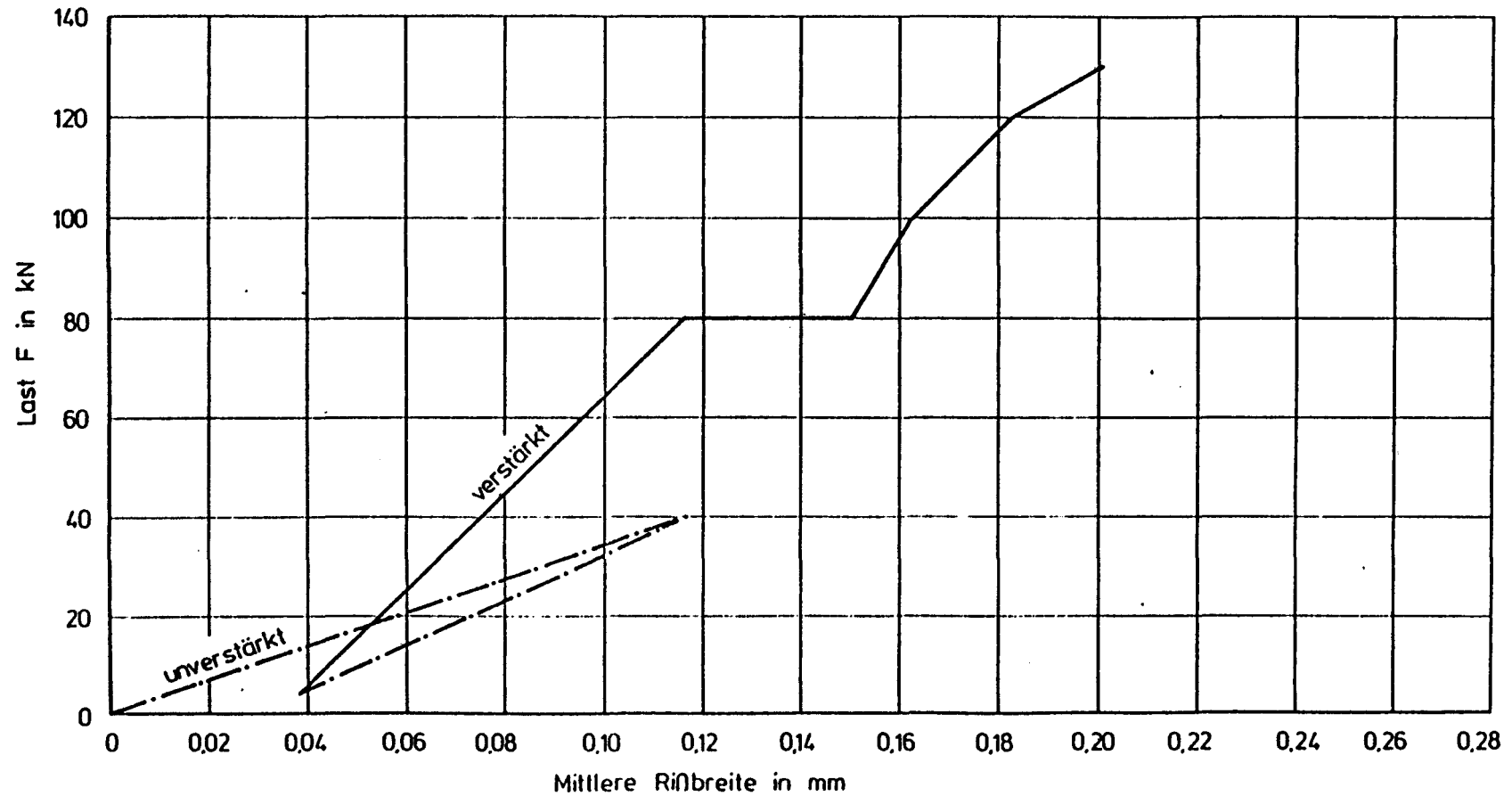


Bild 7.6.3: Mittlere Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 7

## Platte 8

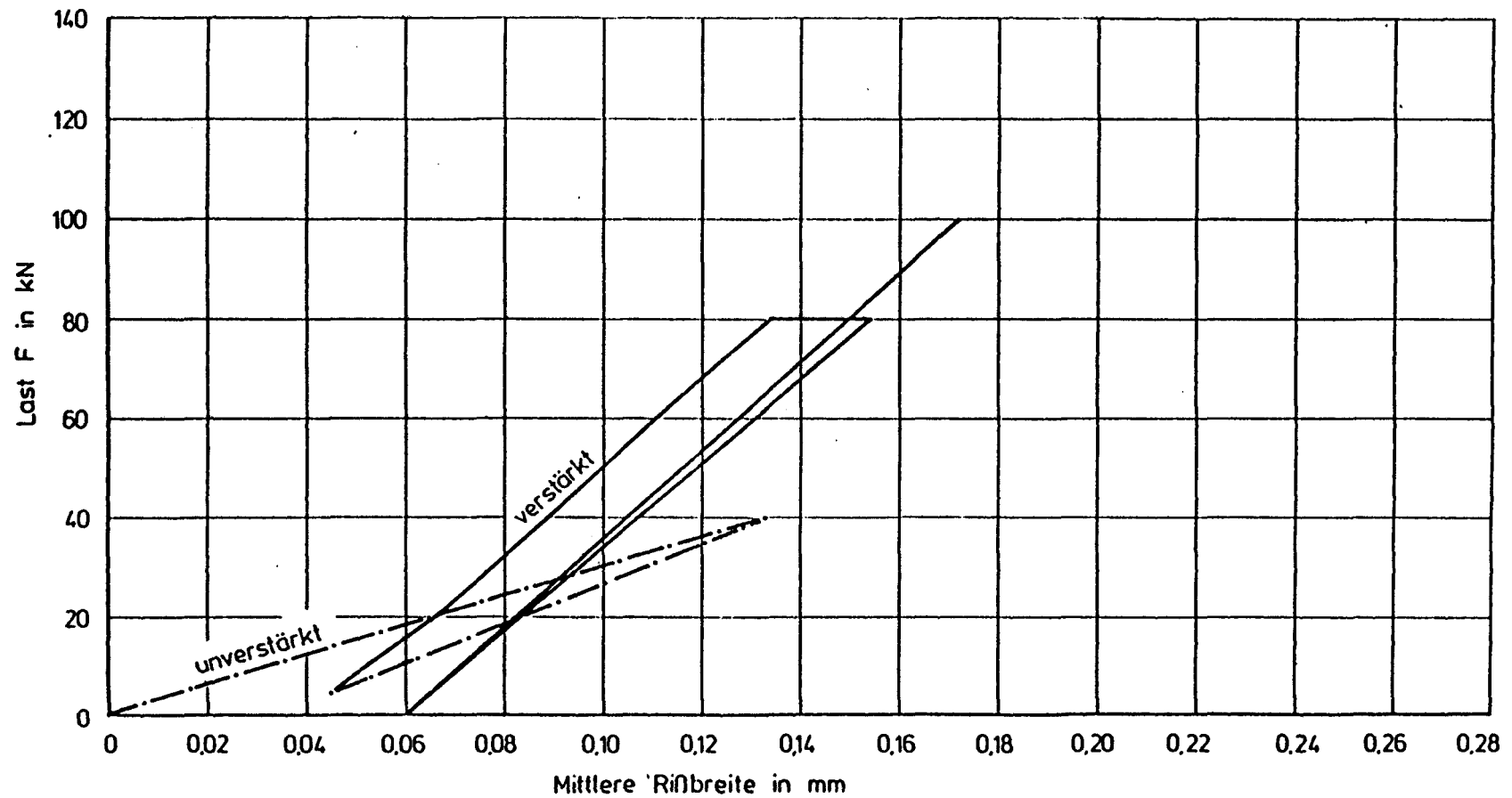


Bild 7.6.4: Mittlere Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 8

## Platte 9

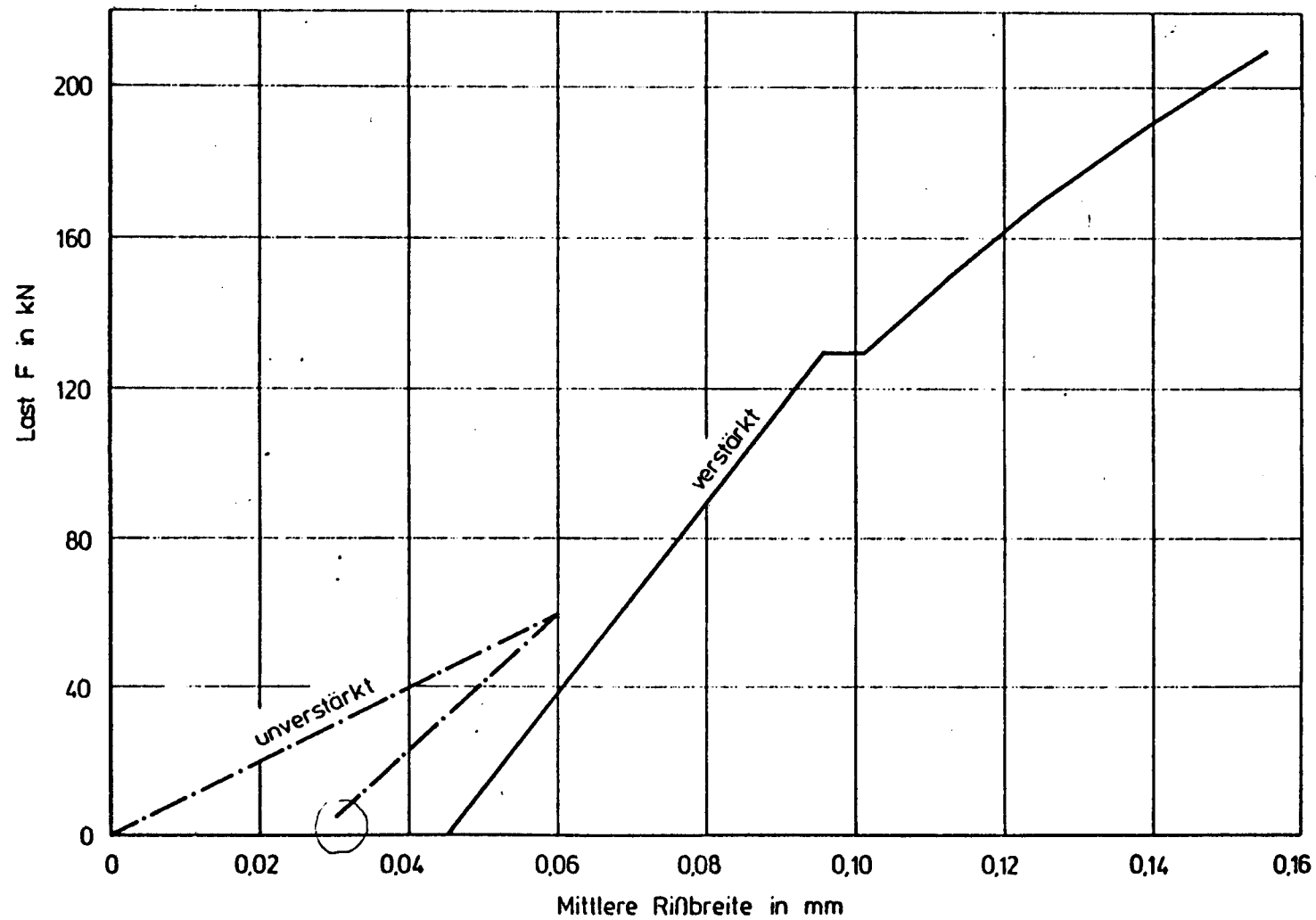


Bild 7.6.5: Mittlere Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 9

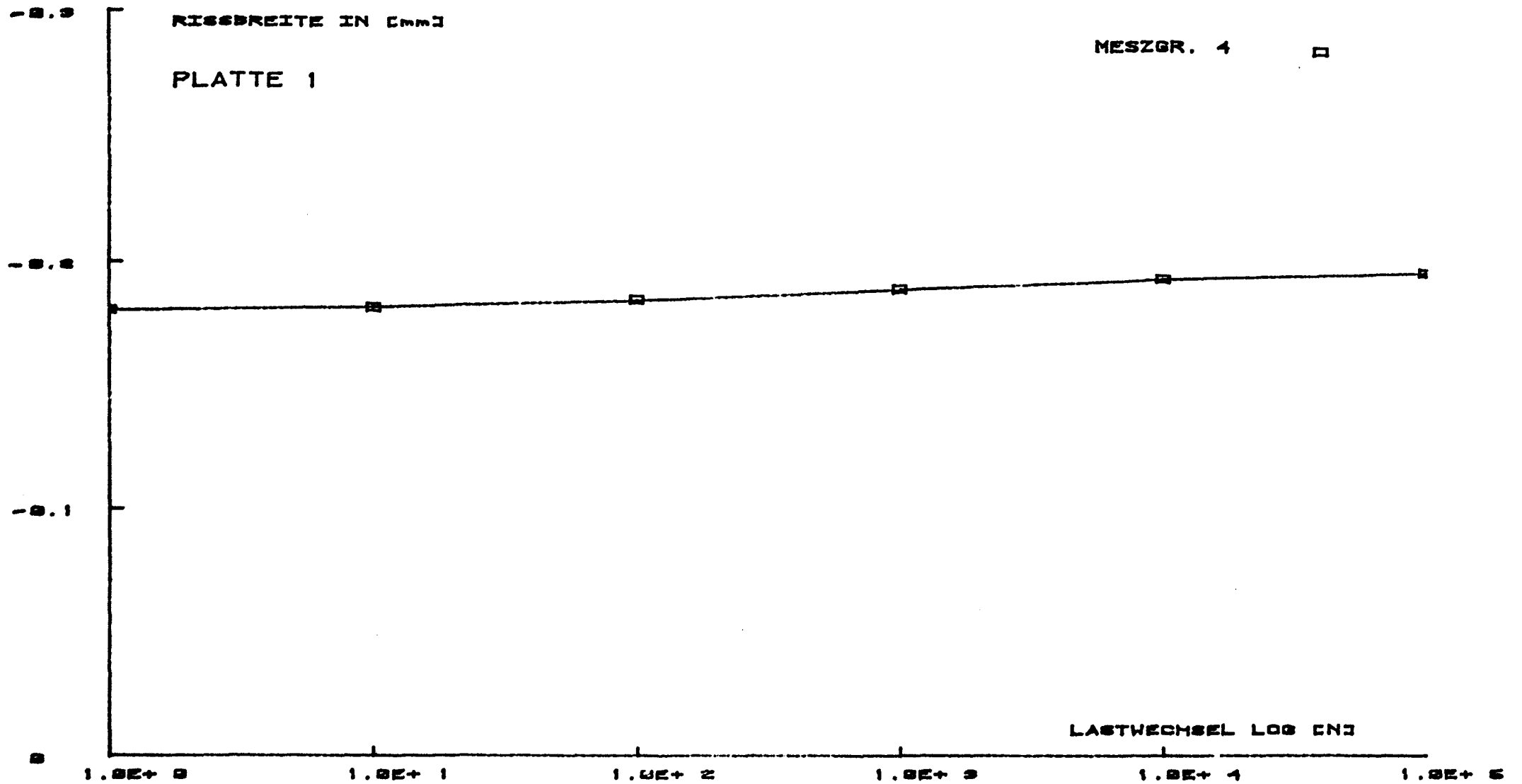


Bild 7.7.1: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 1

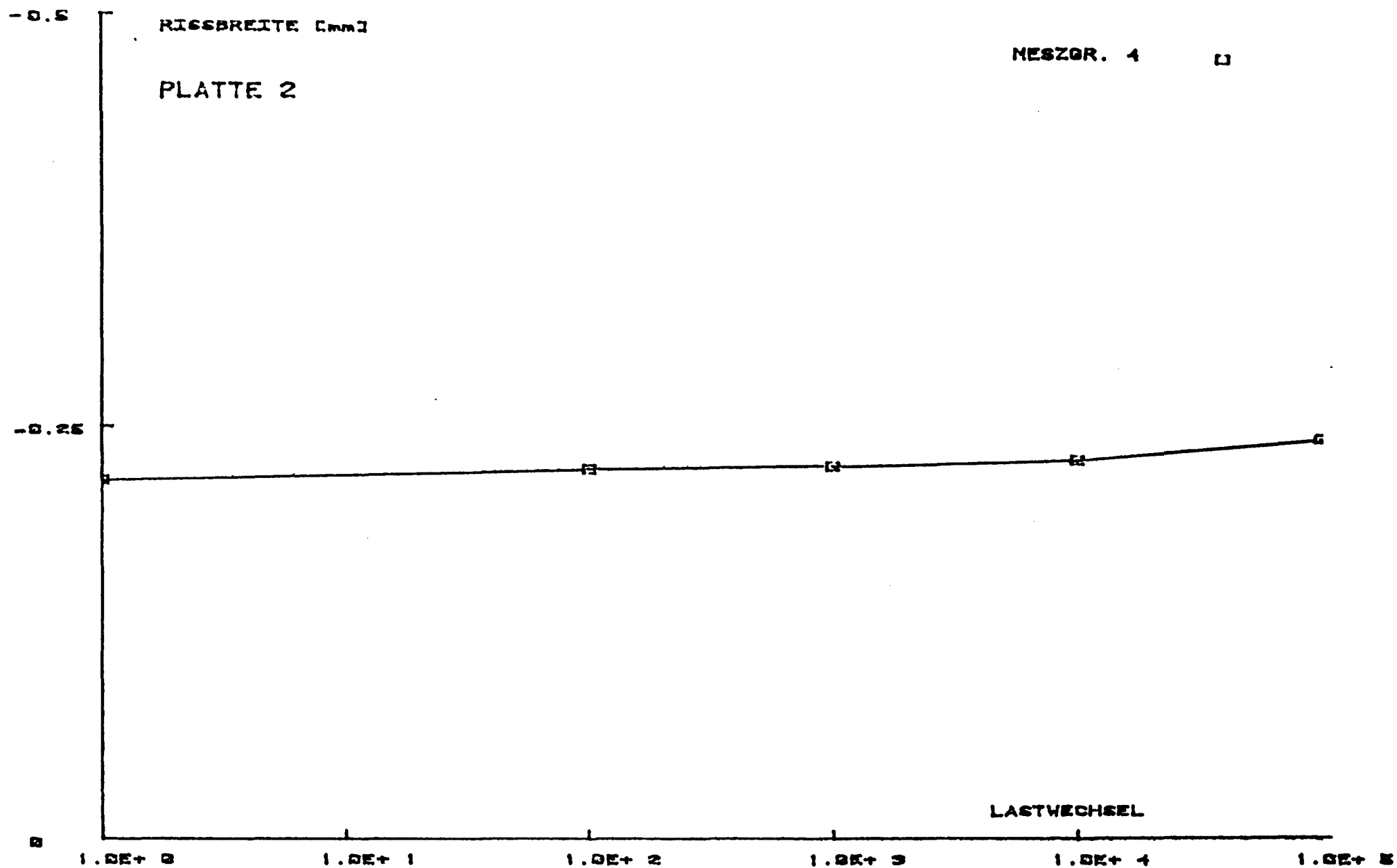


Bild 7.7.2: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 2



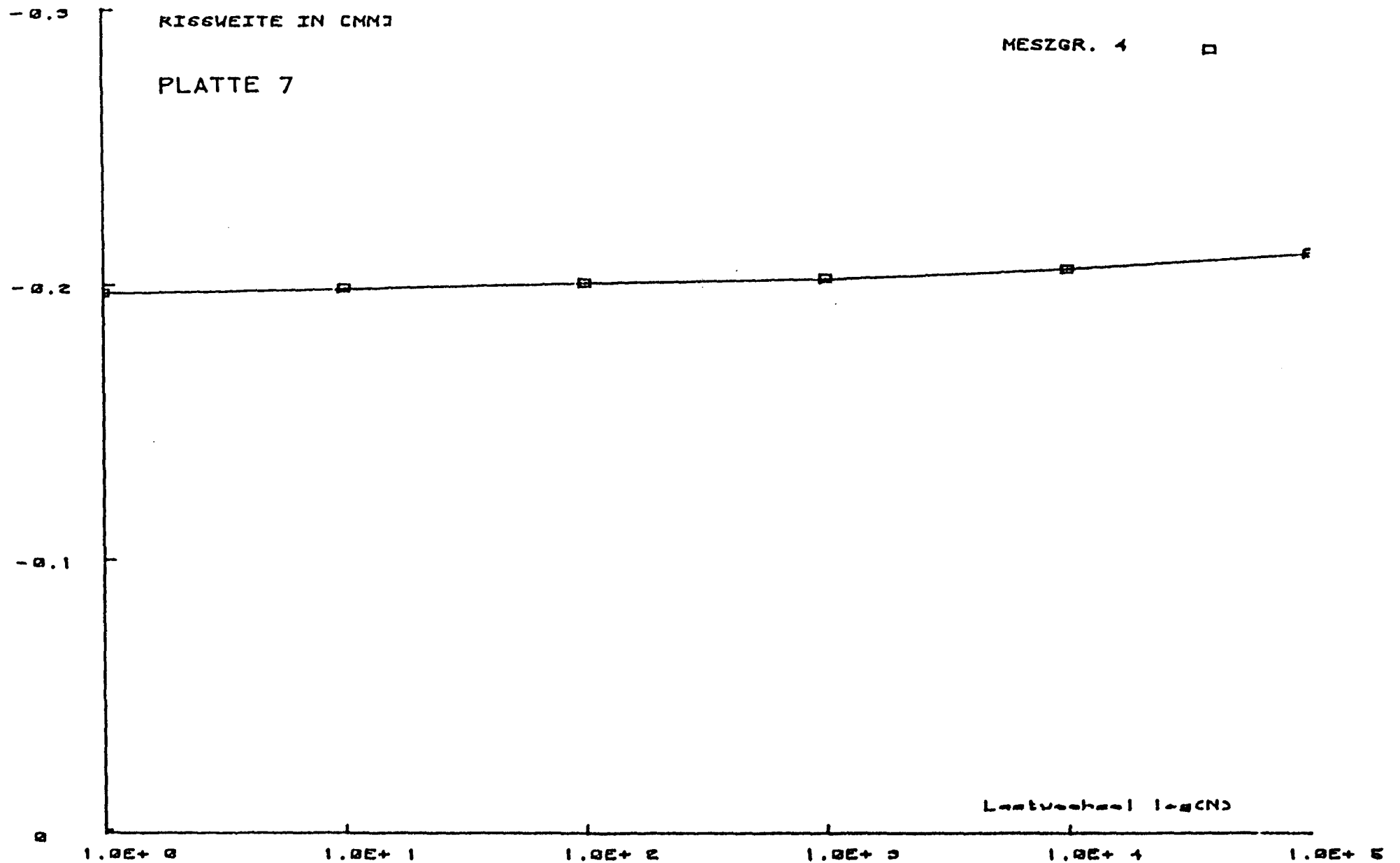


Bild 7.7.3: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 7

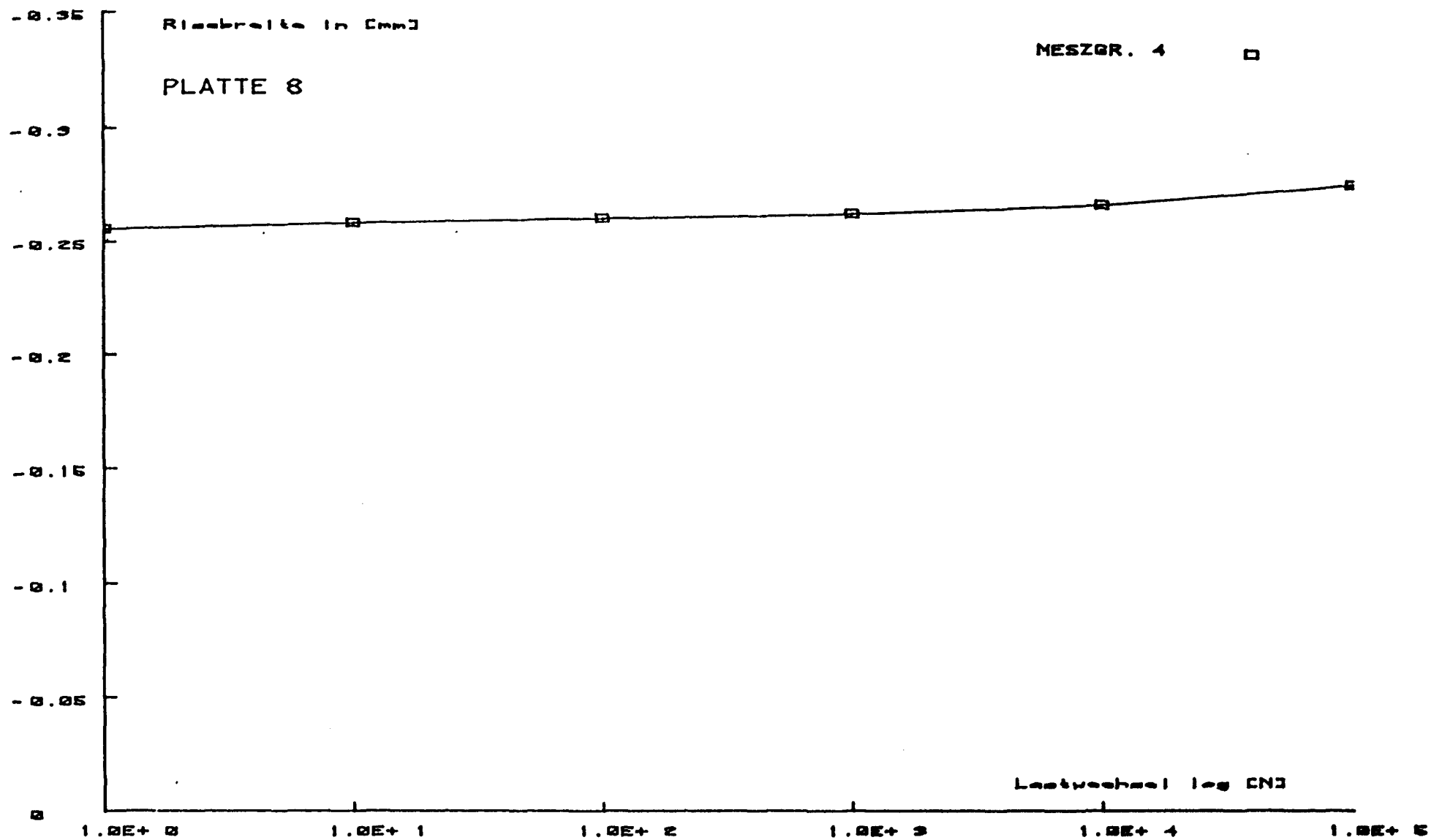


Bild 7.7.4: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 8

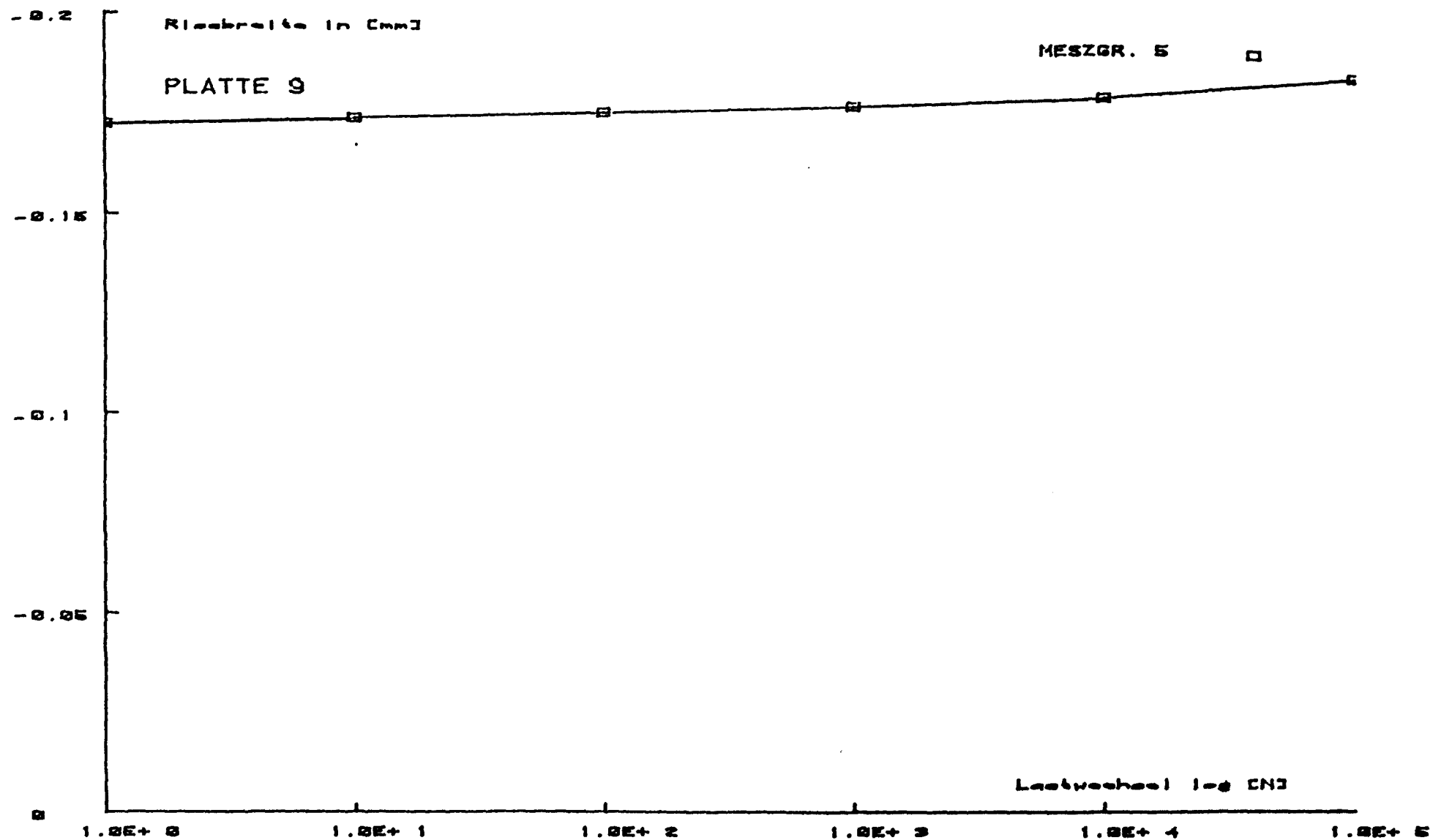


Bild 7.7.5: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 9

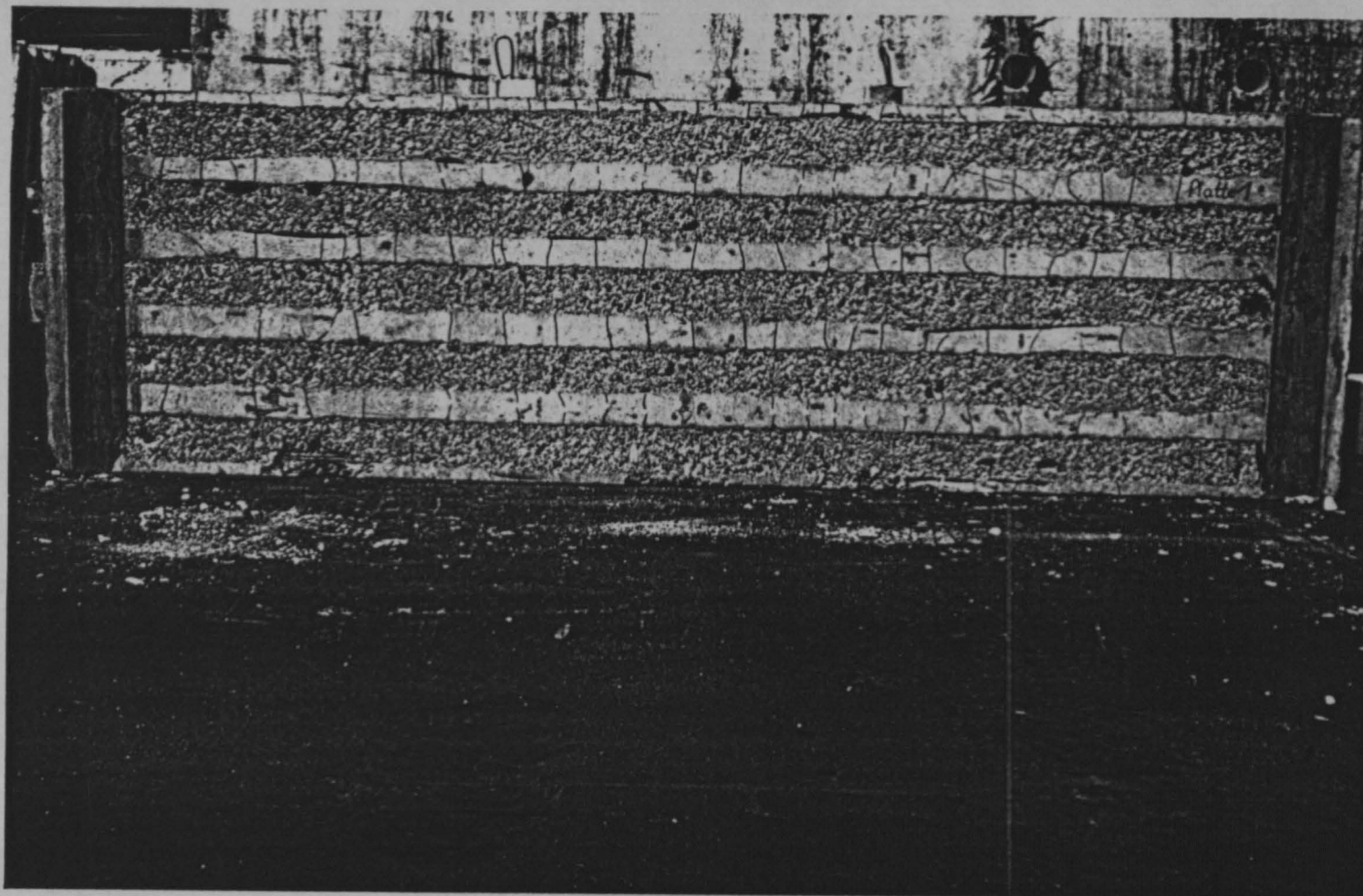


Bild 7.8.1: Rißbild von Platte 1

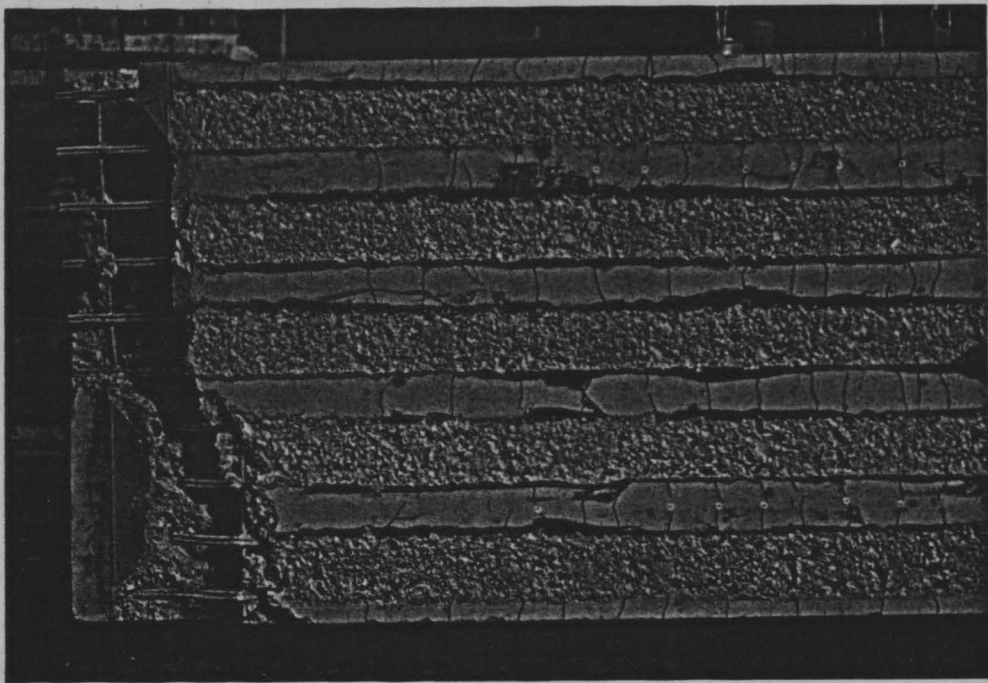


Bild 7.8.2 : Rißbild von Platte 2



Bild 7.8.3: Rißbild von Platte 7



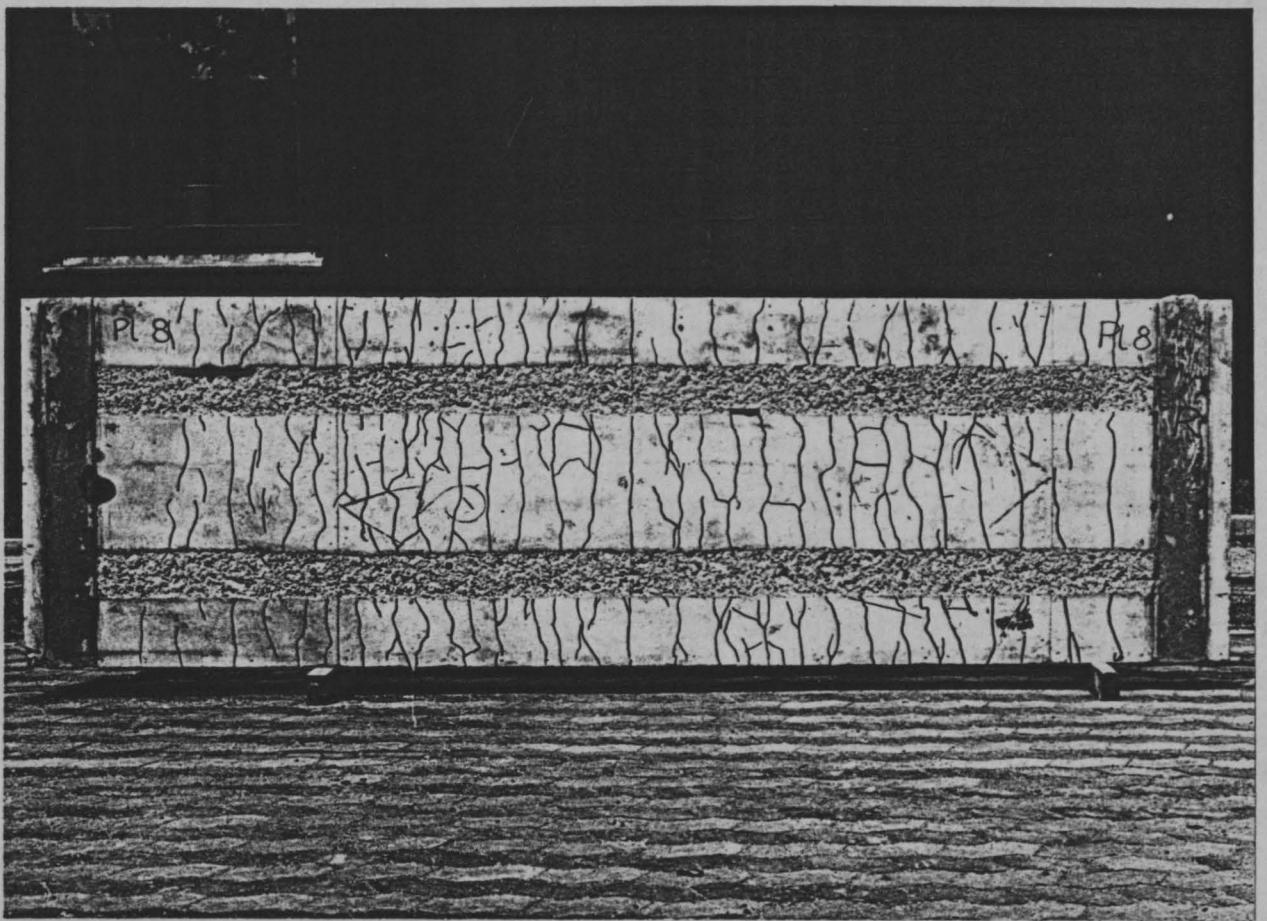


Bild 7.8.4: Rißbild von Platte 8

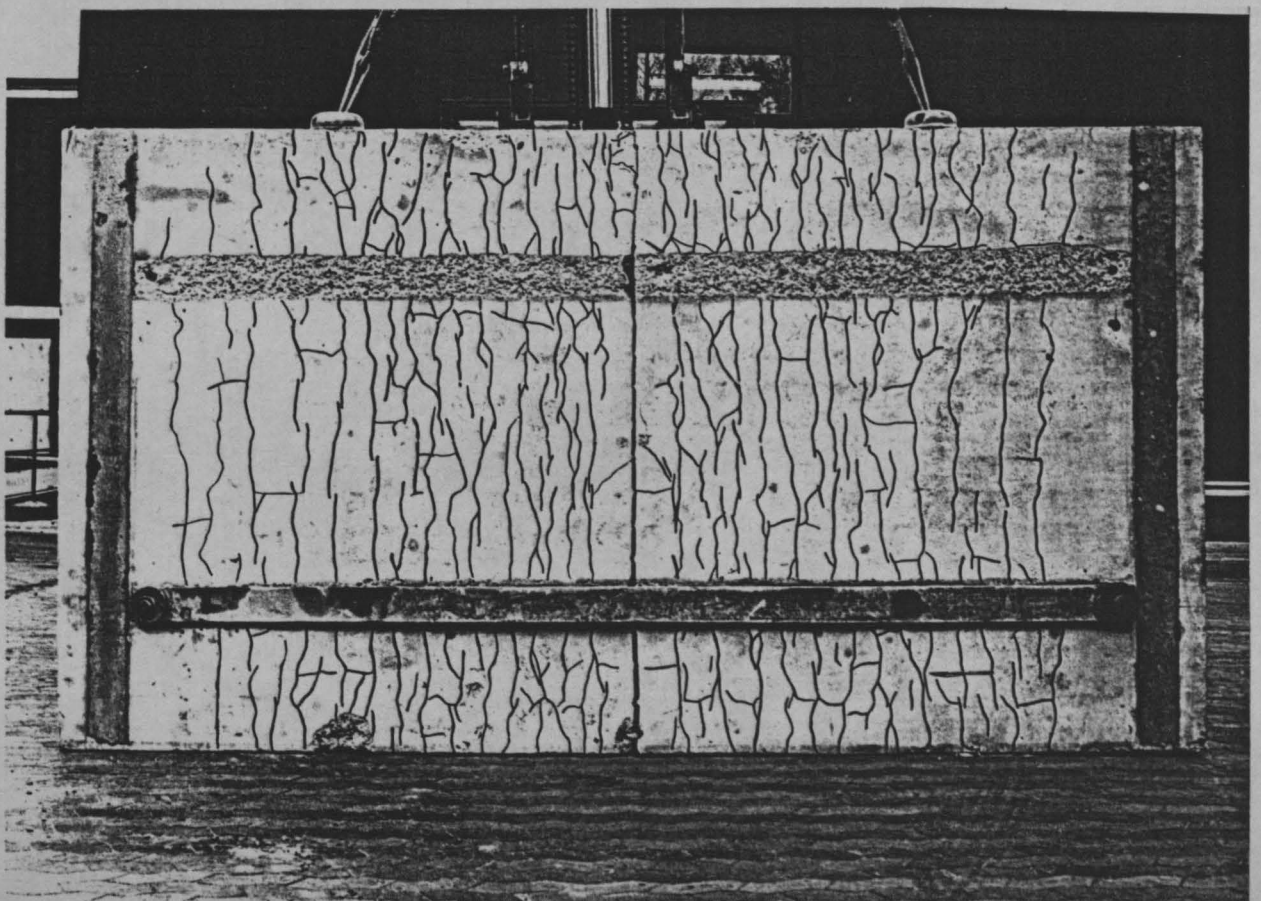


Bild 7.8.5: Rißbild von Platte 9

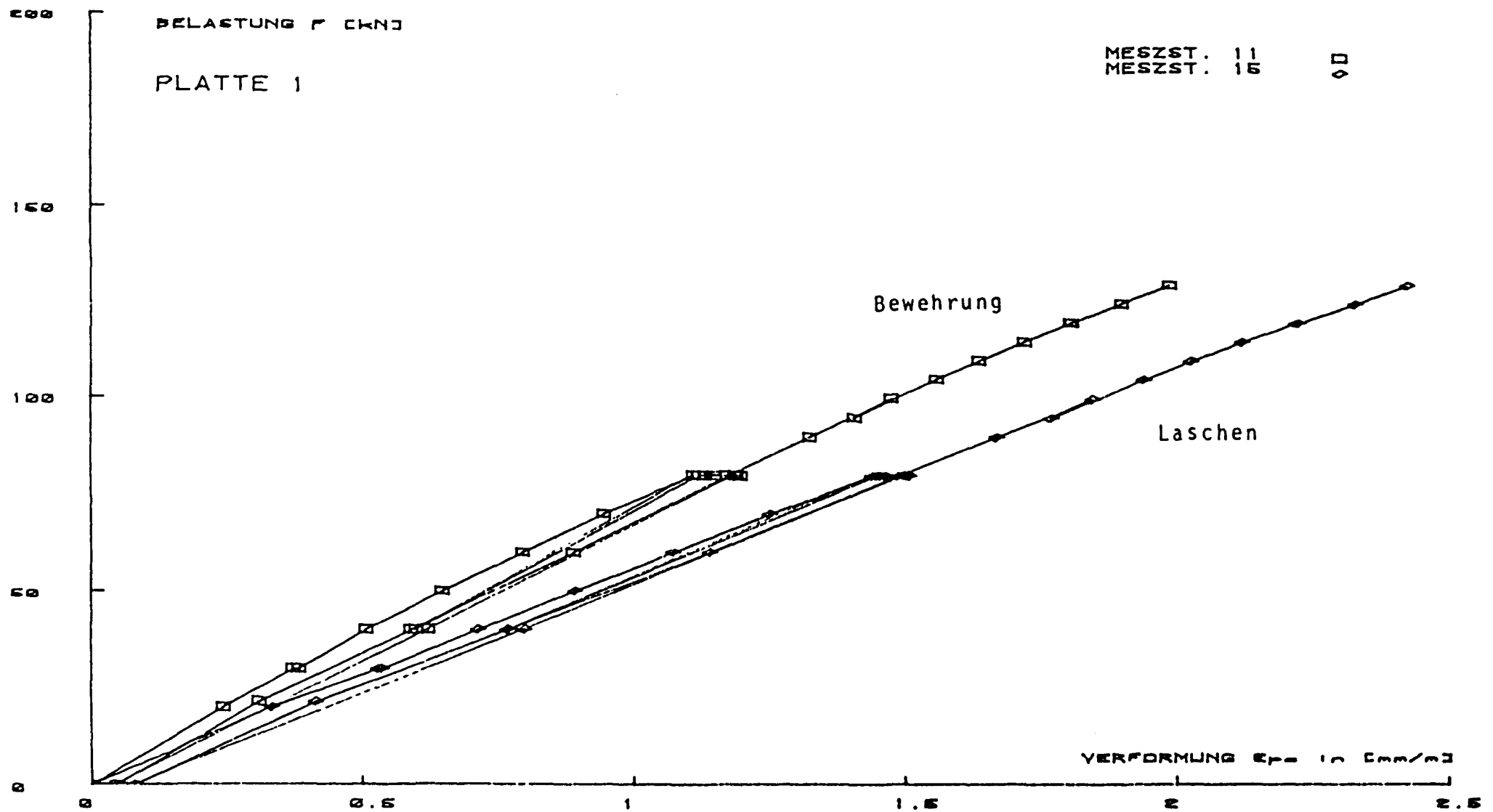


Bild 7.9.1: Maximale Dehnungen der Bewehrung und der Laschen  
im Riß in Abhängigkeit von der Belastung bei

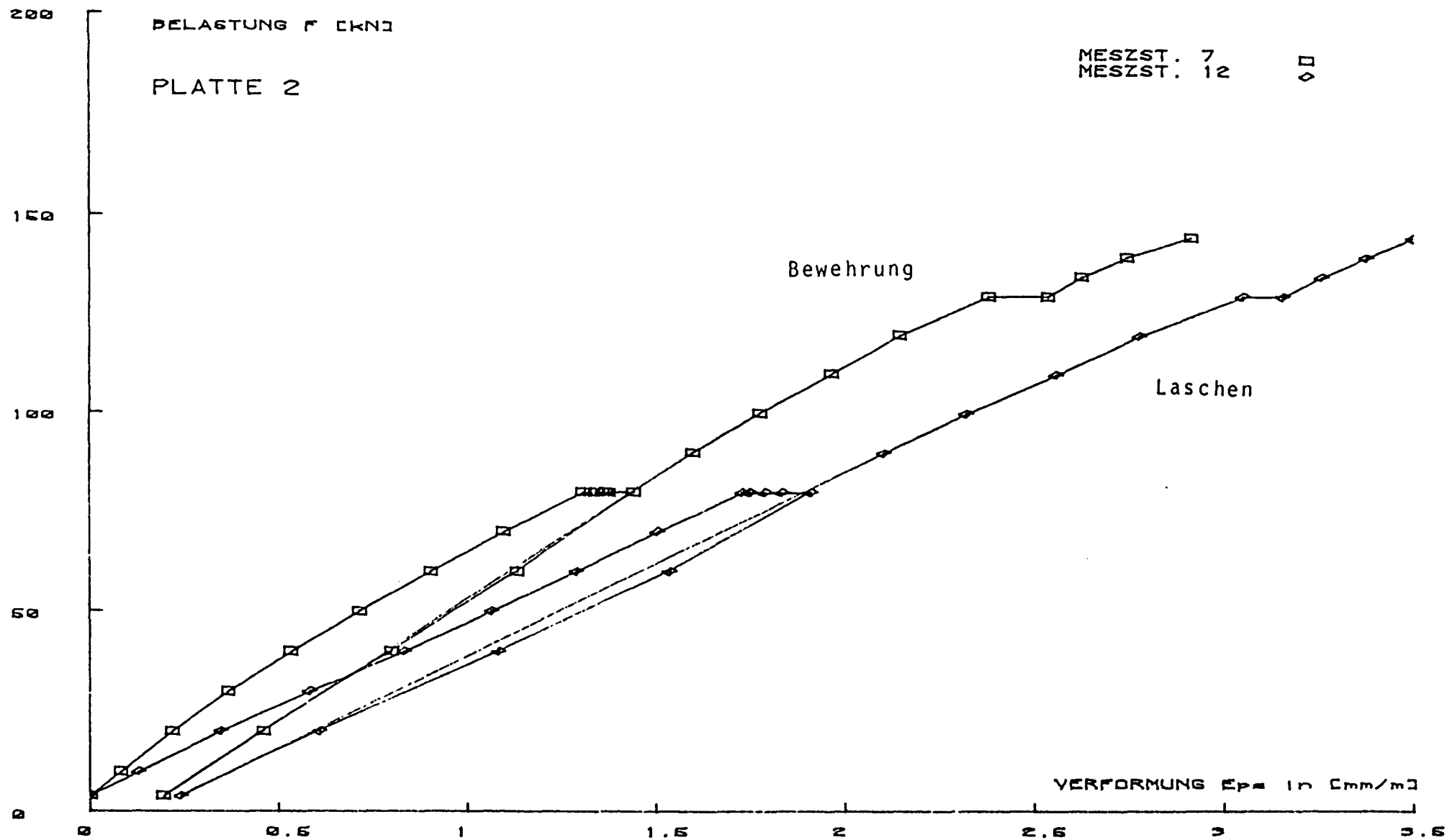


Bild 7.9.2: Maximale Dehnungen der Bewehrung und der Laschen  
 im Riß in Abhängigkeit von der Belastung bei  
 Platte 2



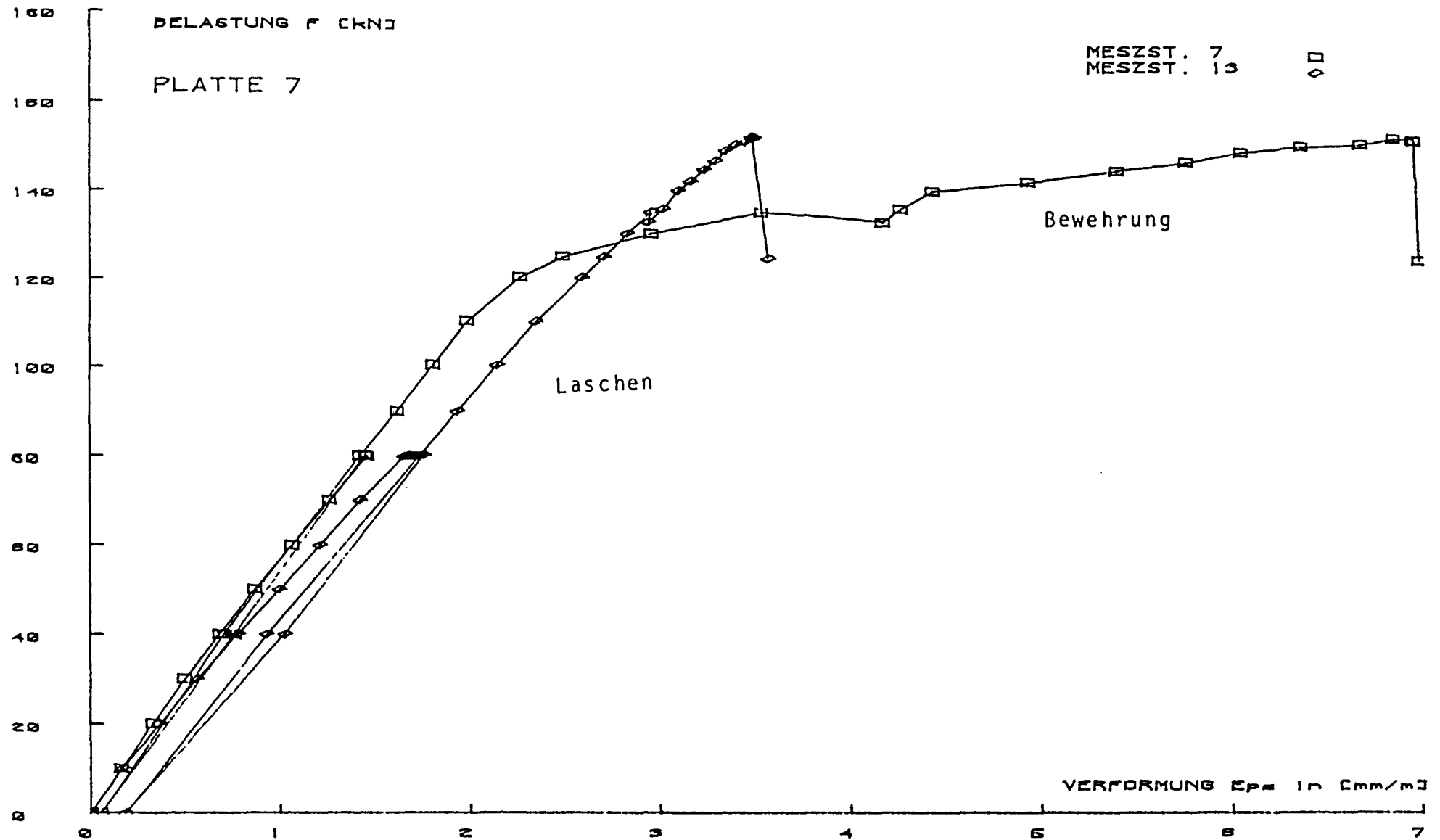


Bild 7.9.3: Maximale Dehnungen der Bewehrung und der Laschen  
im Riß in Abhängigkeit von der Belastung bei

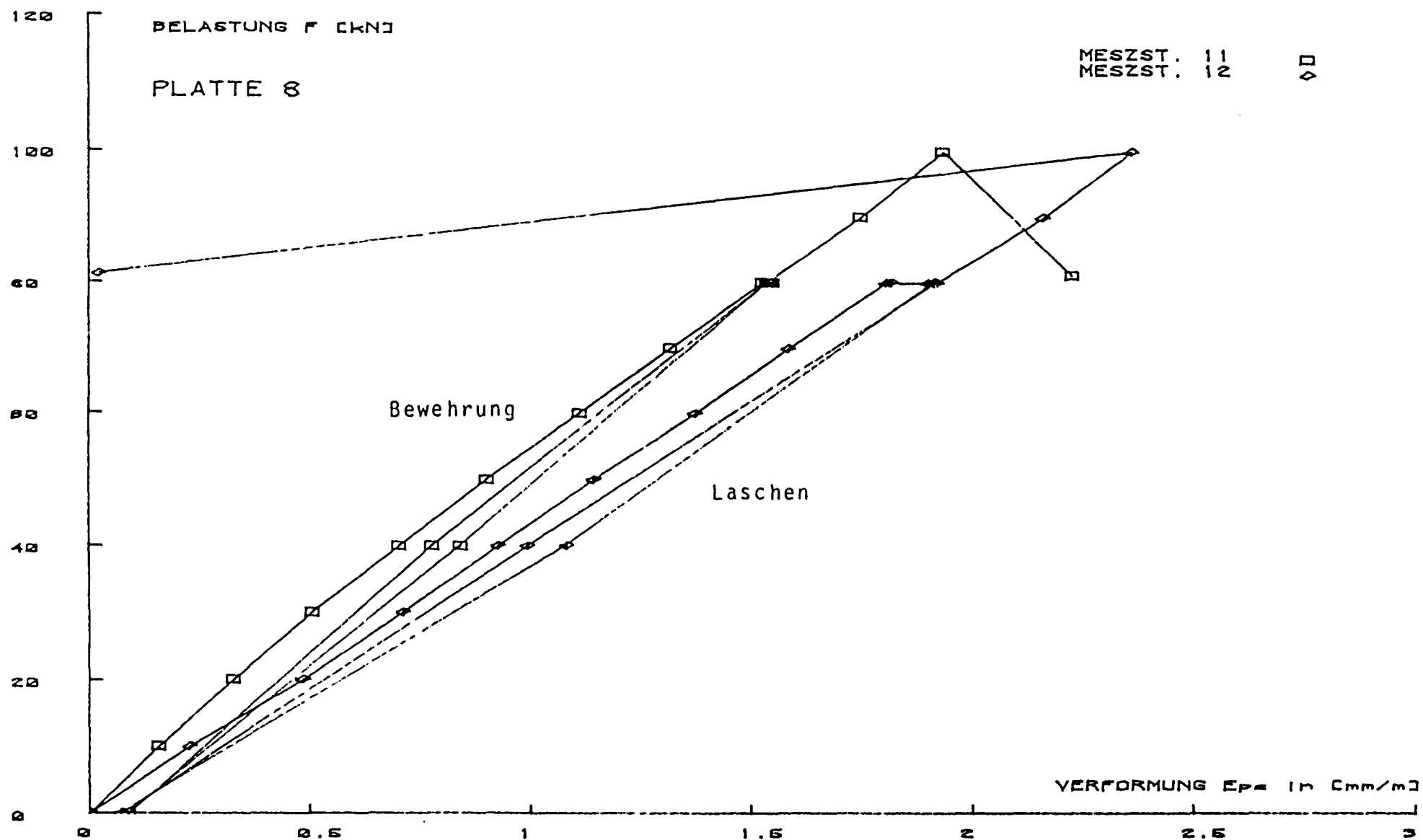
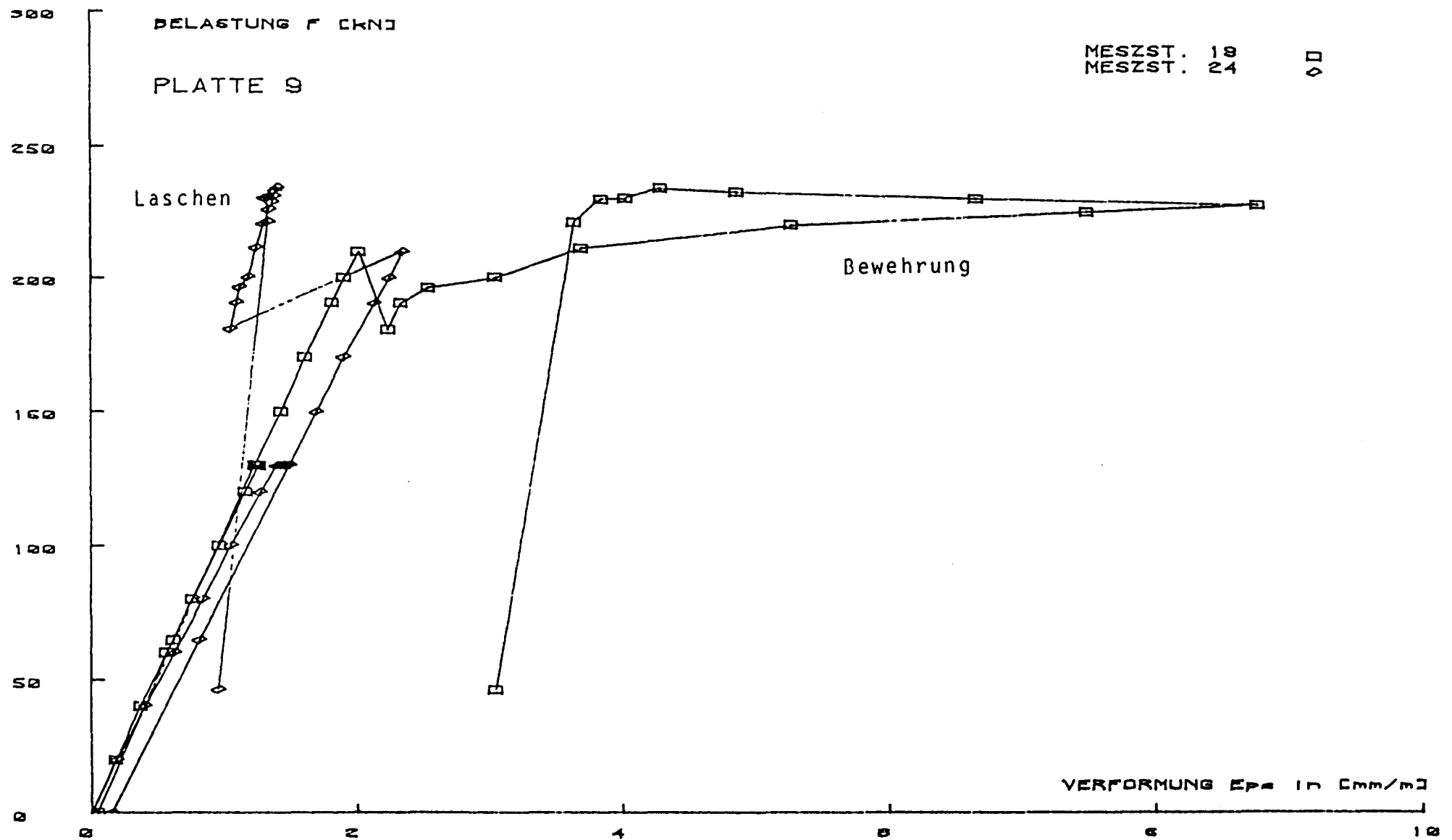


Bild 7.9.4: Maximale Dehnungen der Bewehrung und der Laschen im Riß in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 8



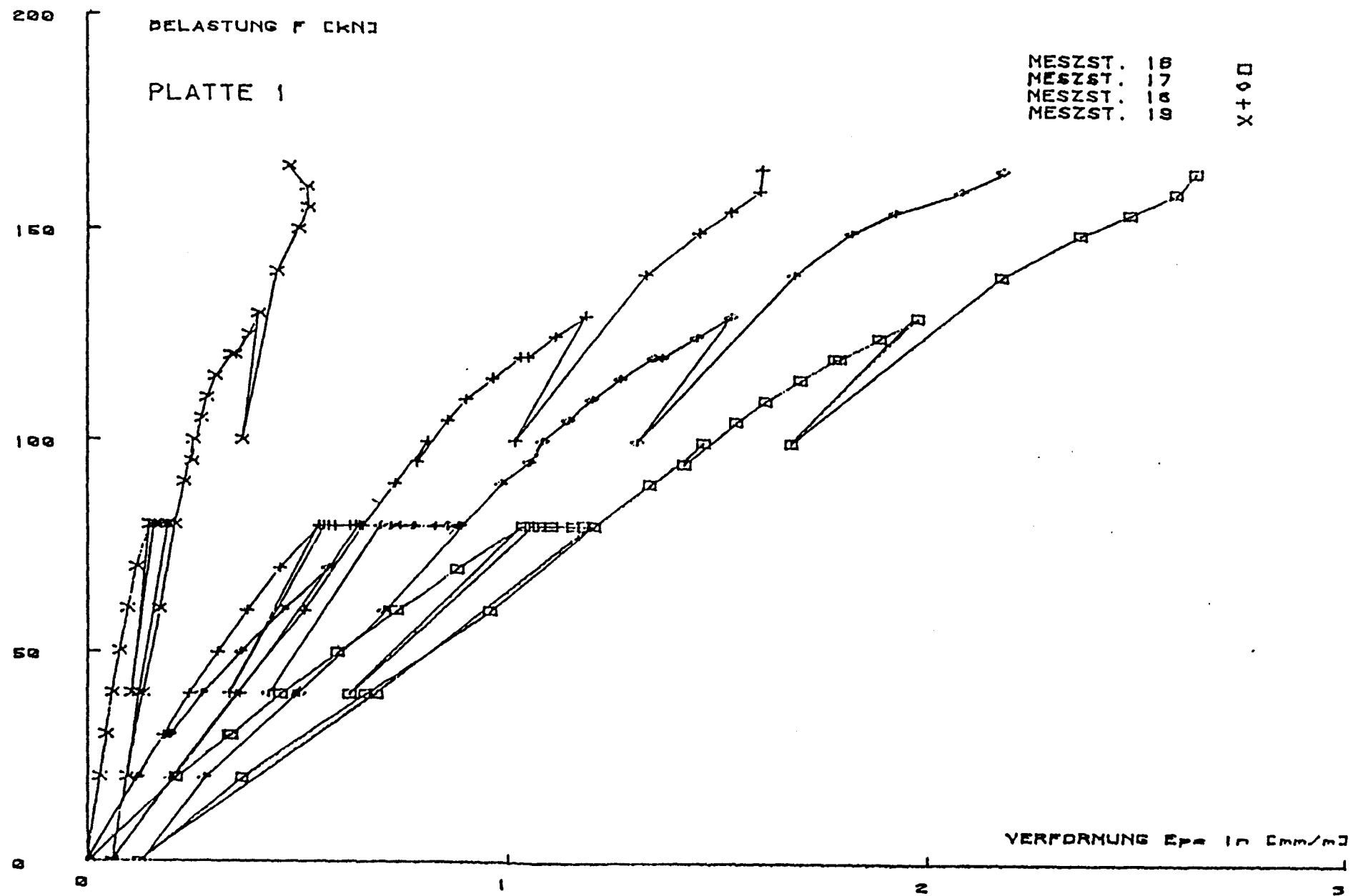


Bild 7.10.1: Laschendehnungen im Riß im Verankerungsbereich  
in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 1

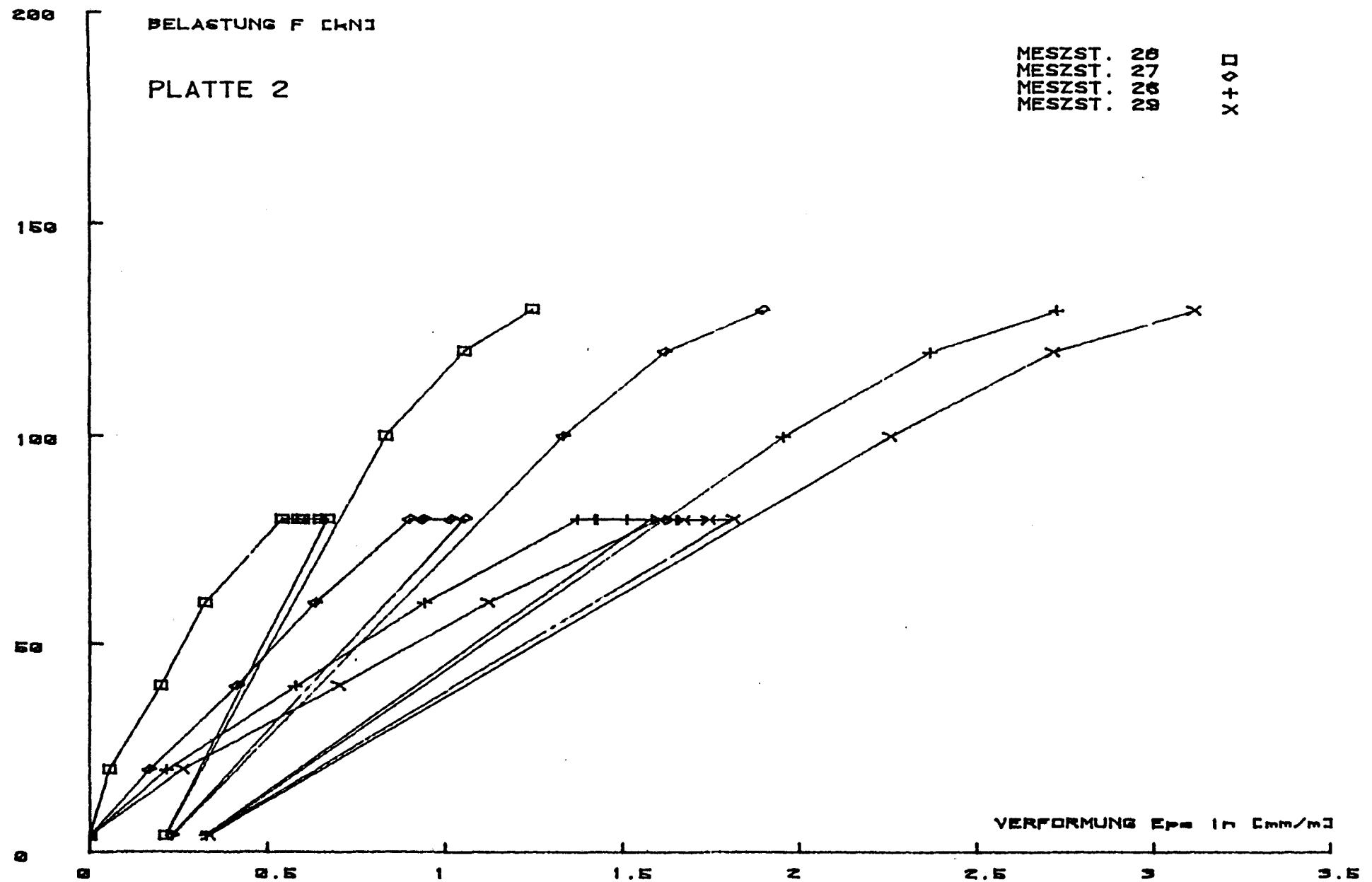


Bild 7.10.2: Laschendehnungen im Riß im Verankerungsbereich  
in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 2

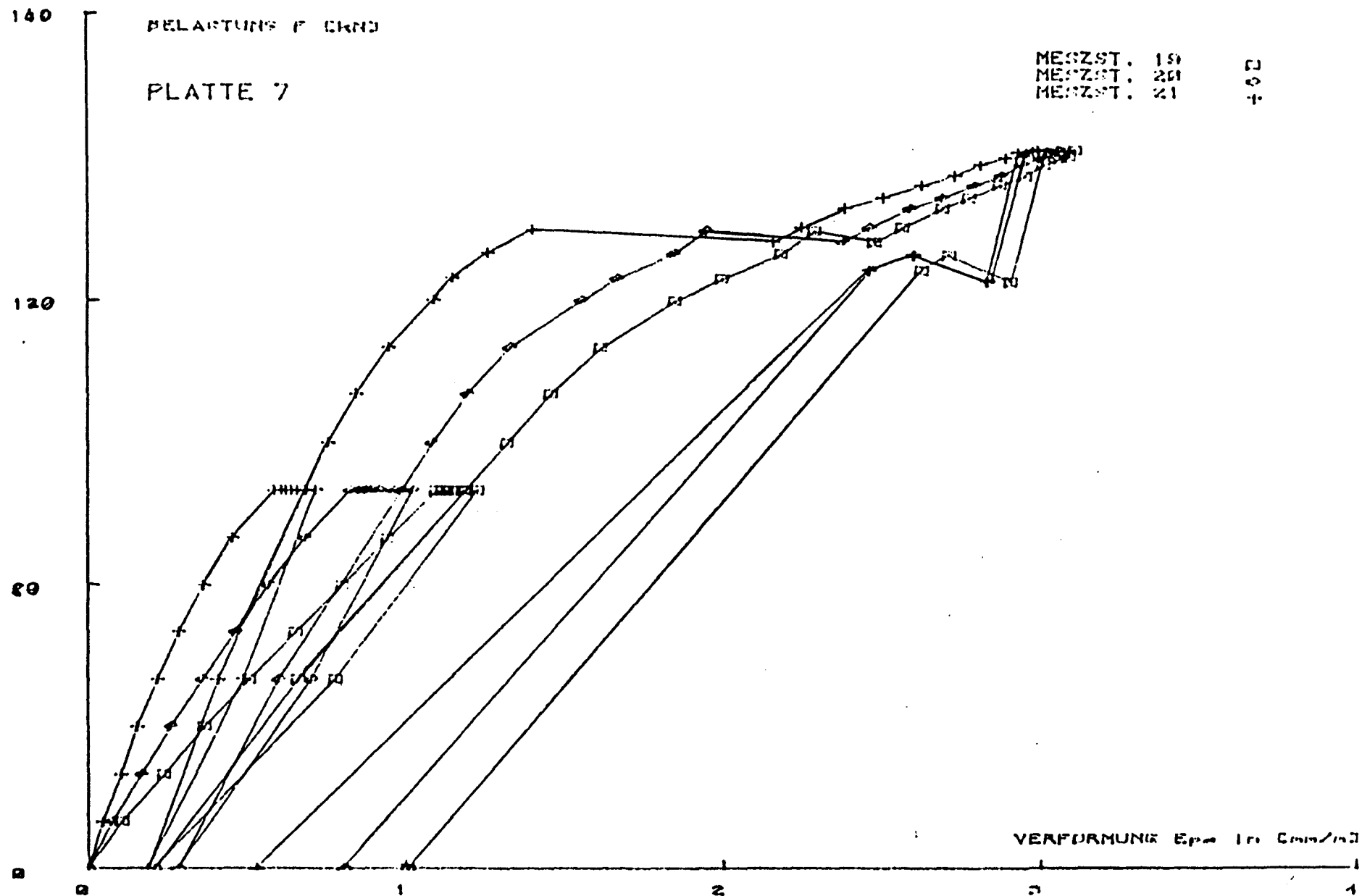


Bild 7.10.3: Laschendehnungen im RiB im Verankerungsbereich  
in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 7

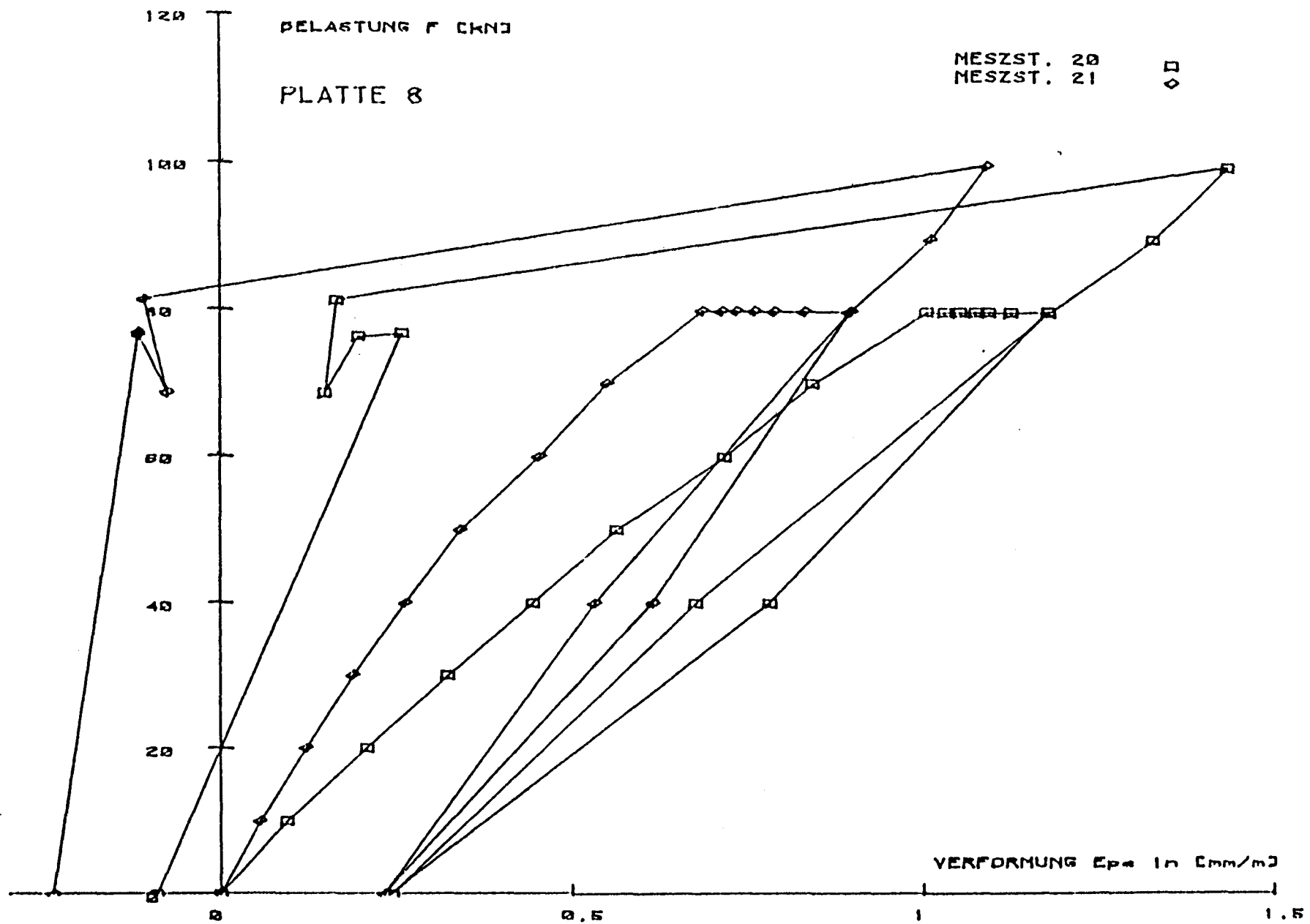


Bild 7.10.4: Laschendehnungen im RiB im Verankerungsbereich  
 in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 8

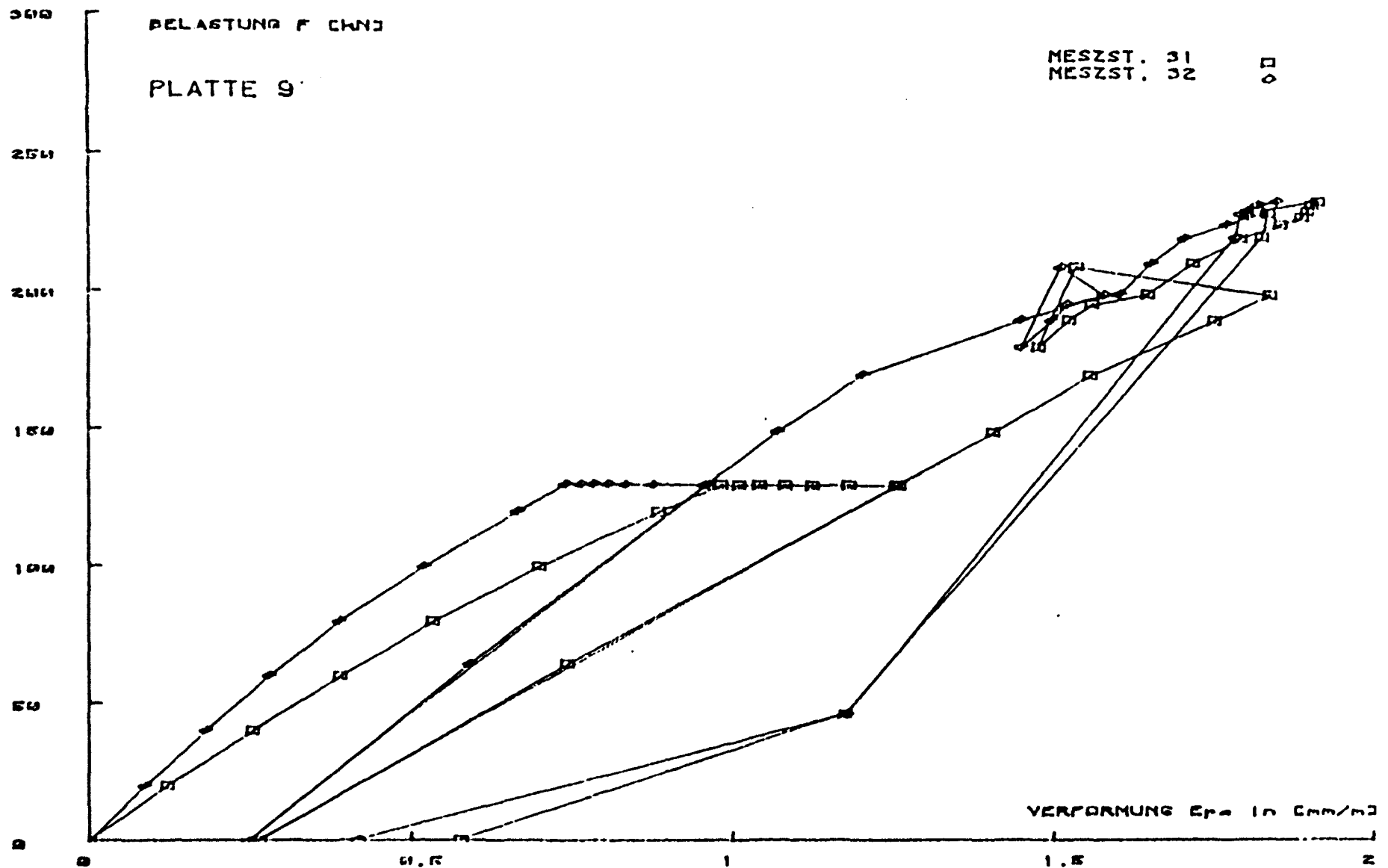


Bild 7.10.5: Laschendehnungen im Riß im Verankerungsbereich  
in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 9



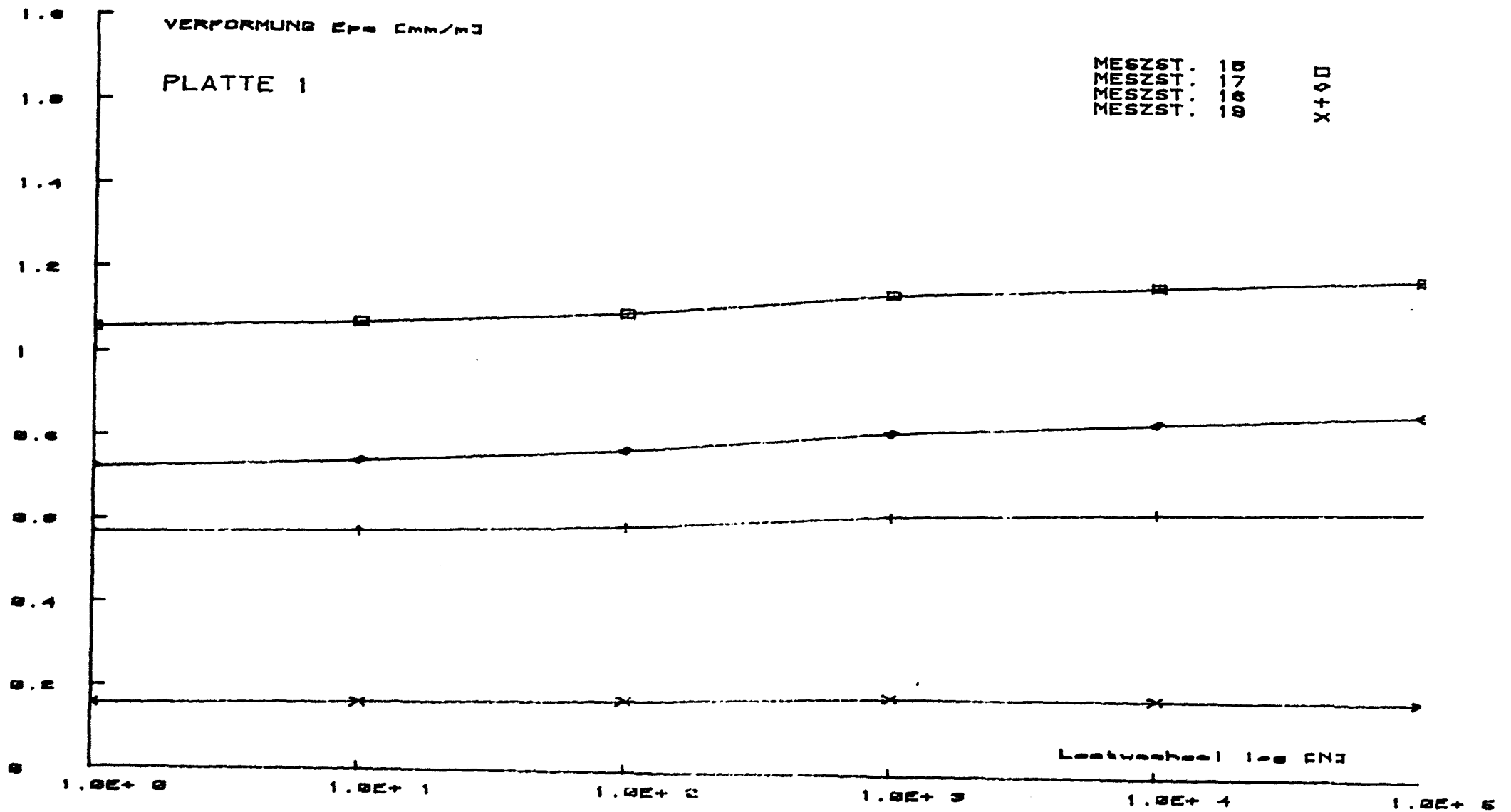


Bild 7.11.1: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 1

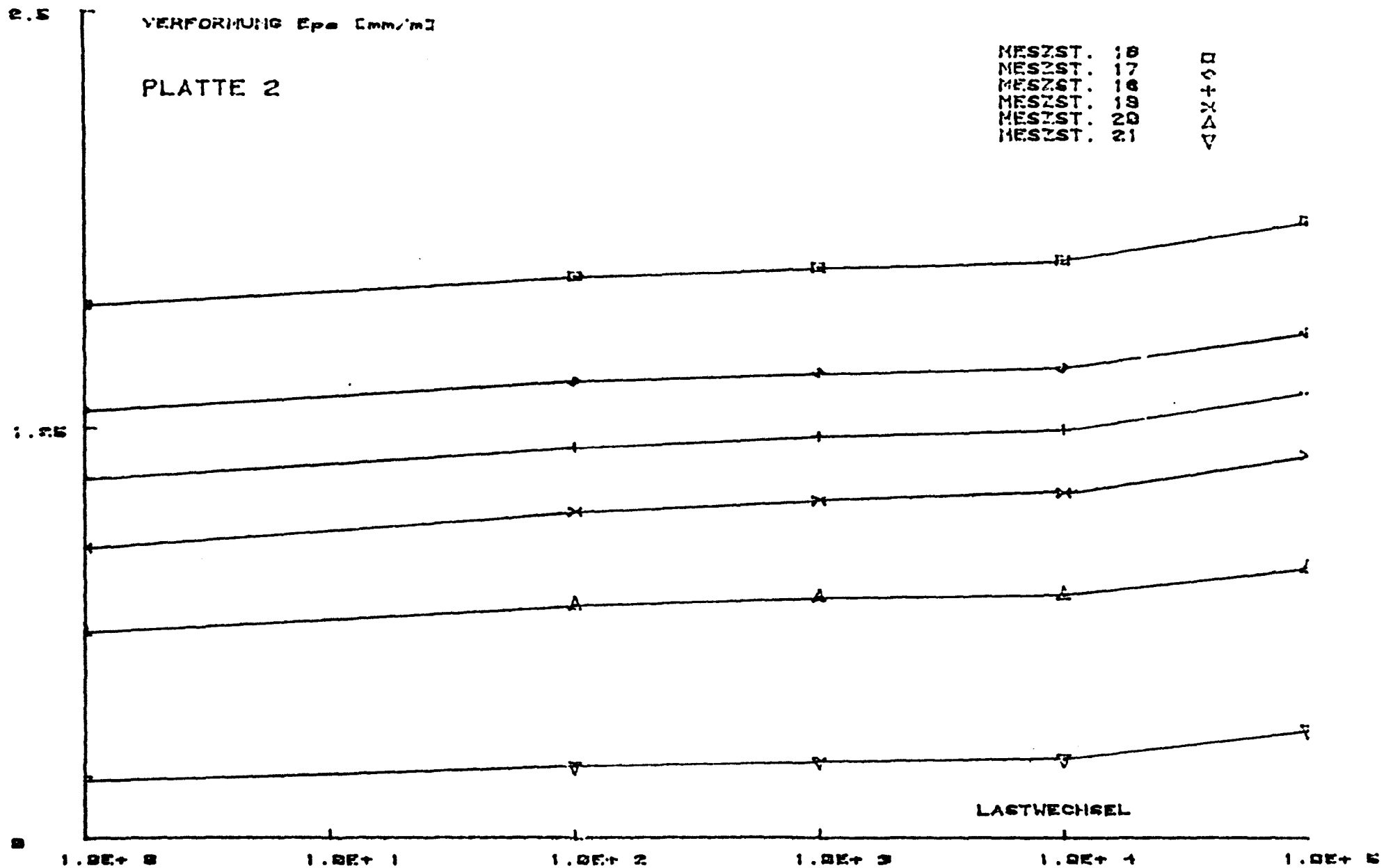


Bild 7.11.2: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 2

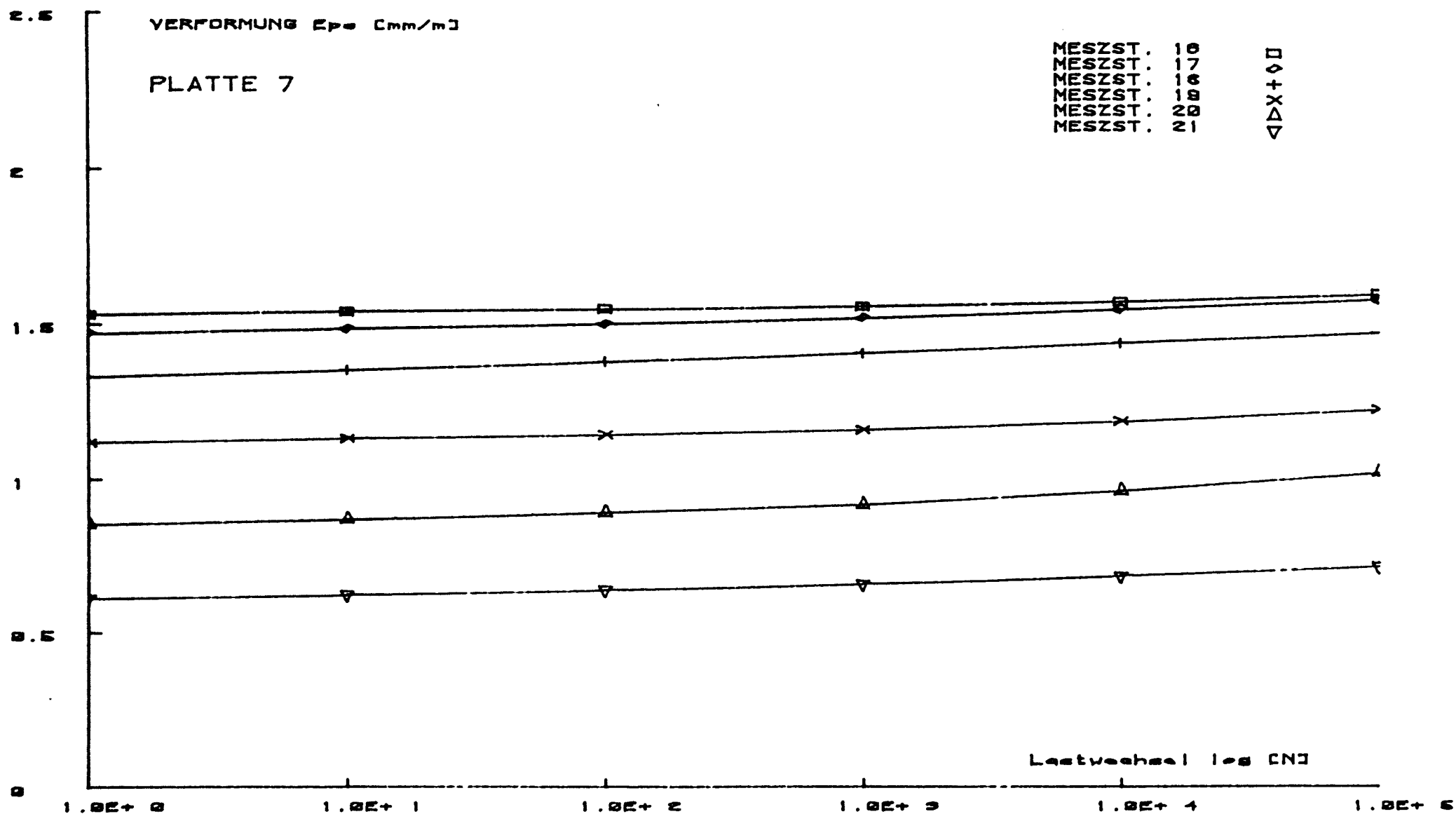


Bild 7.11.3: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 7

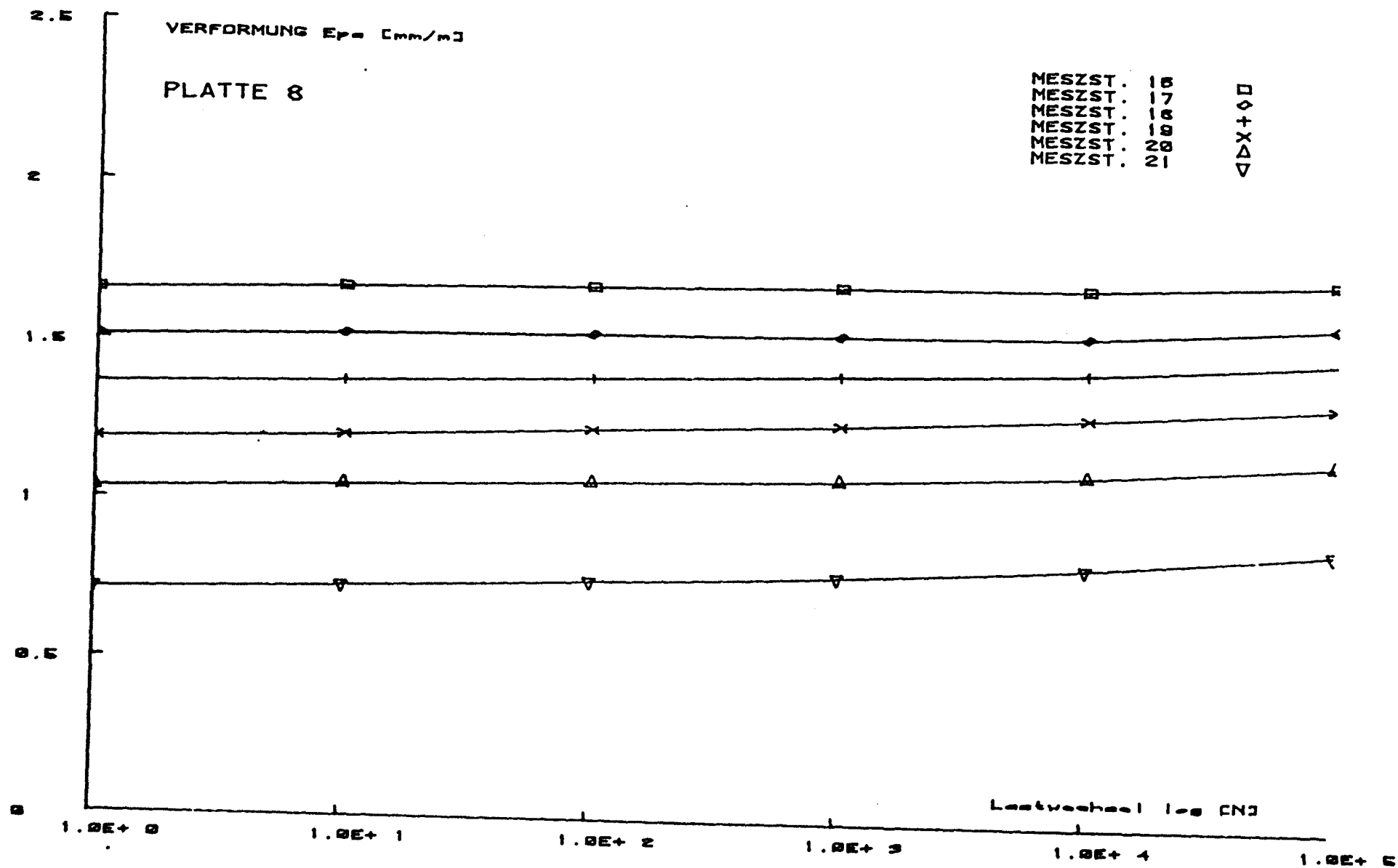


Bild 7.11.4: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 8

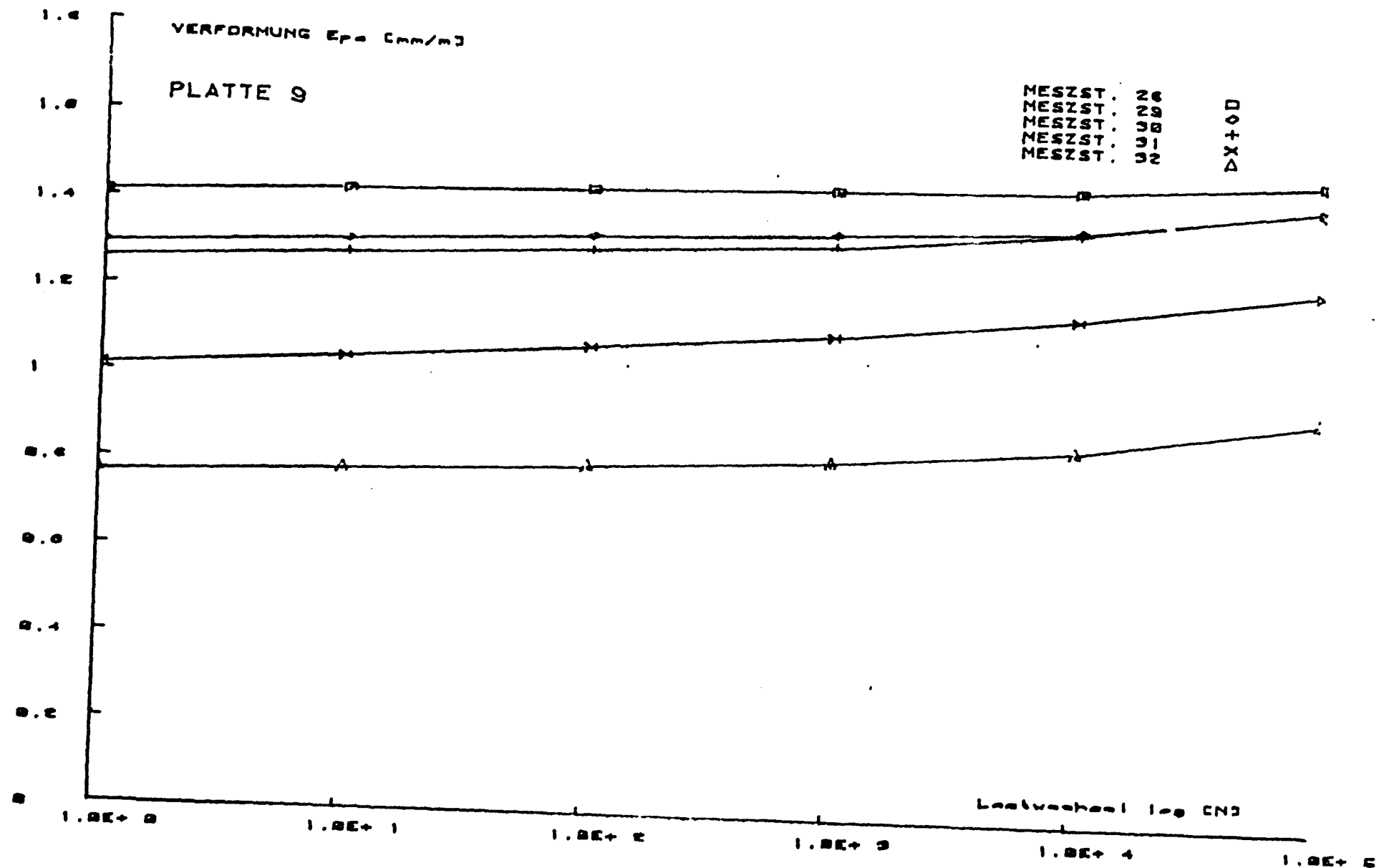


Bild 7.11.5: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 9

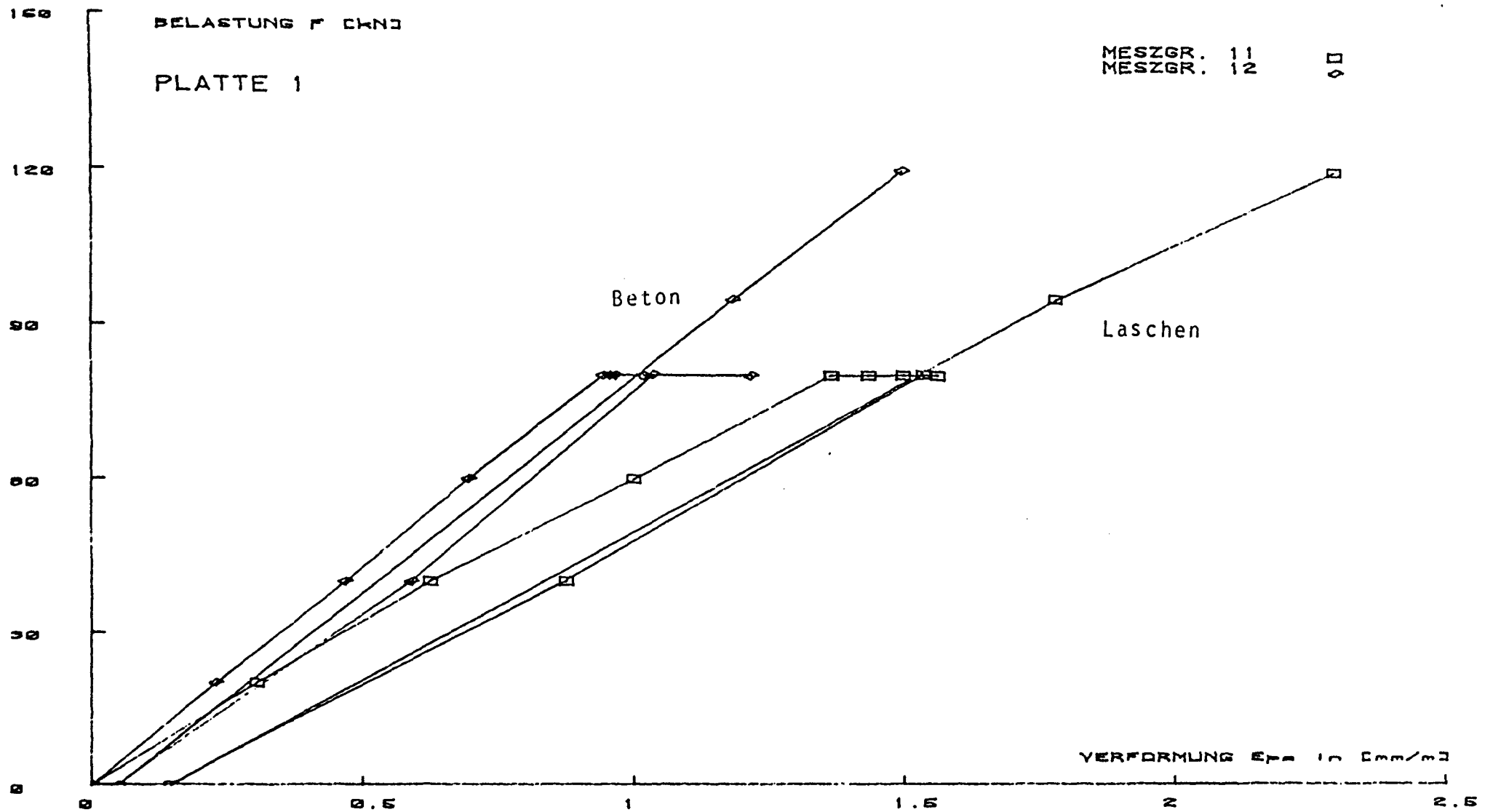


Bild 7.12.1: Mittlere Dehnungen des Betons und der Lasche in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 1

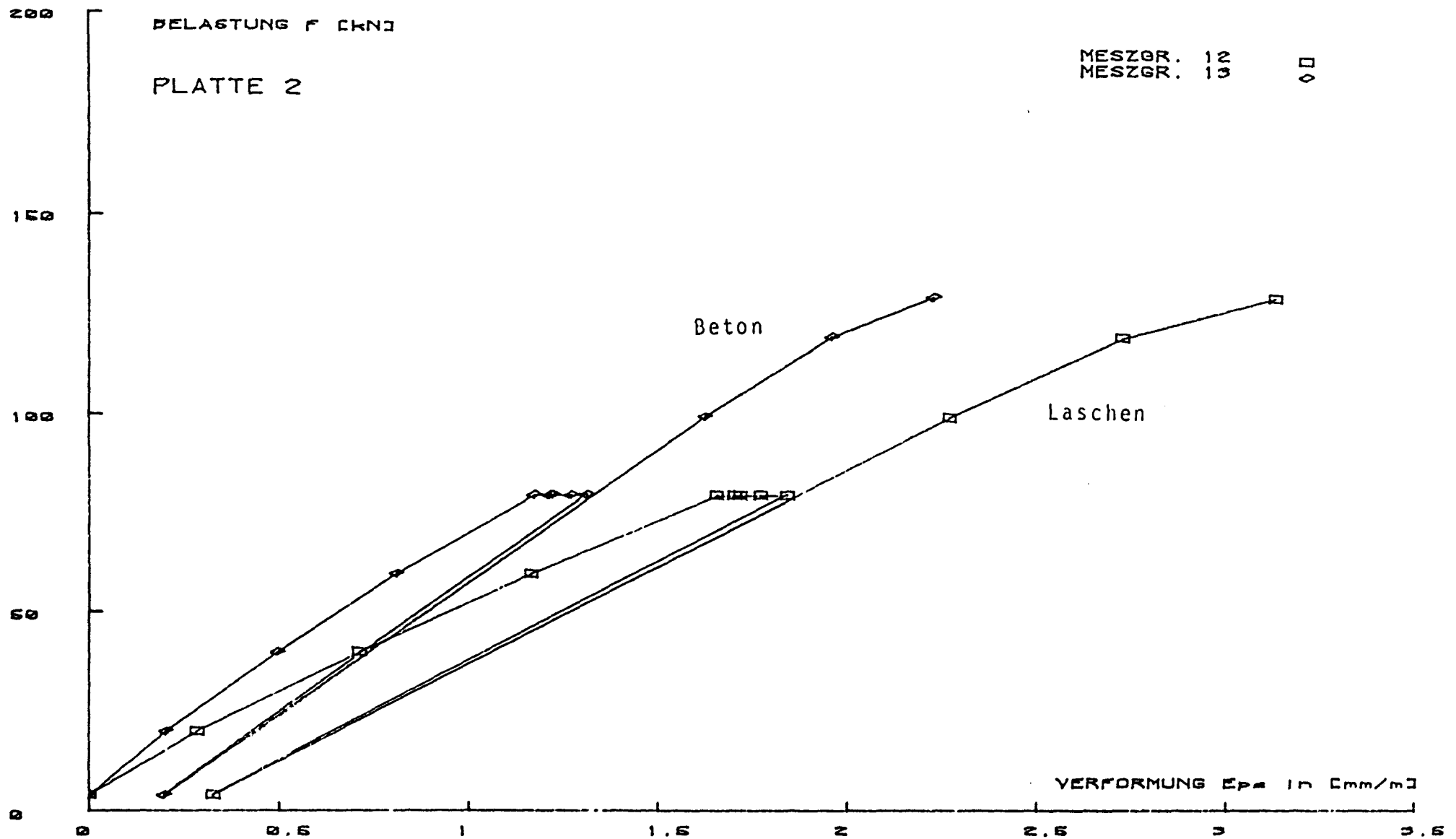


Bild 7.12.2: Mittlere Dehnungen des Betons und der Lasche in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 2

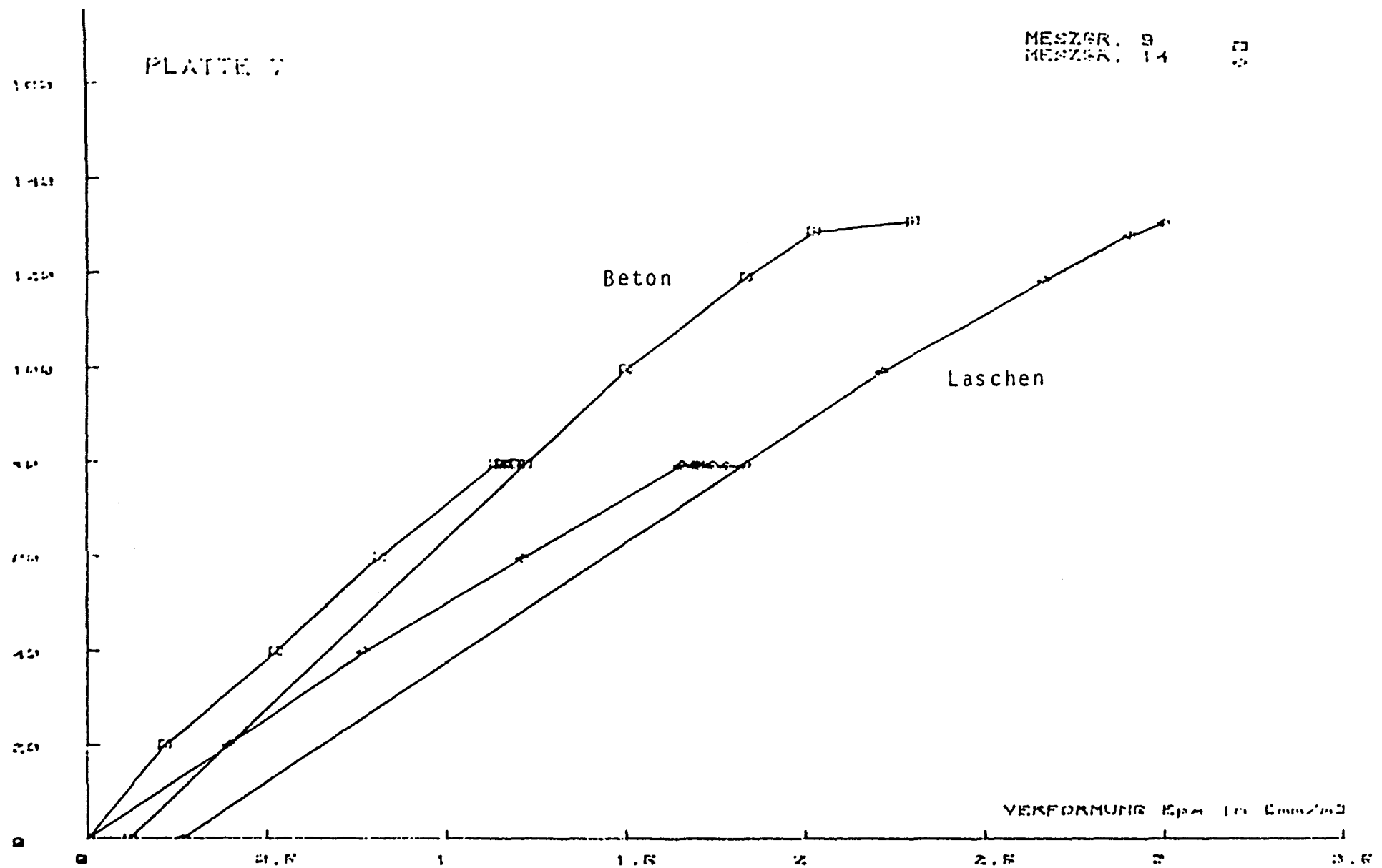


Bild 7.12.3: Mittlere Dehnungen des Betons und der Lasche in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 7



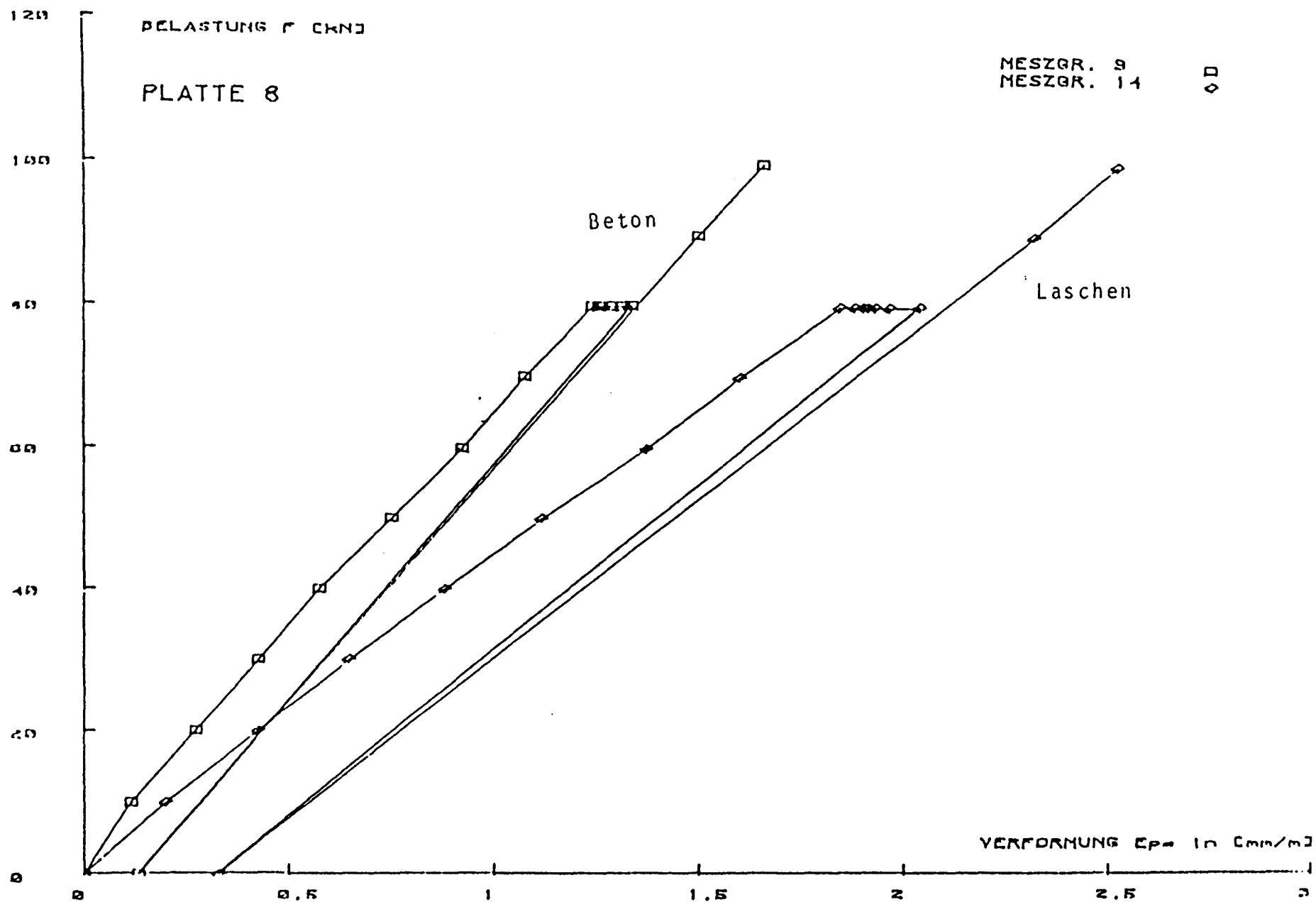


Bild 7.12.4: Mittlere Dehnungen des Betons und der Lasche in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 8

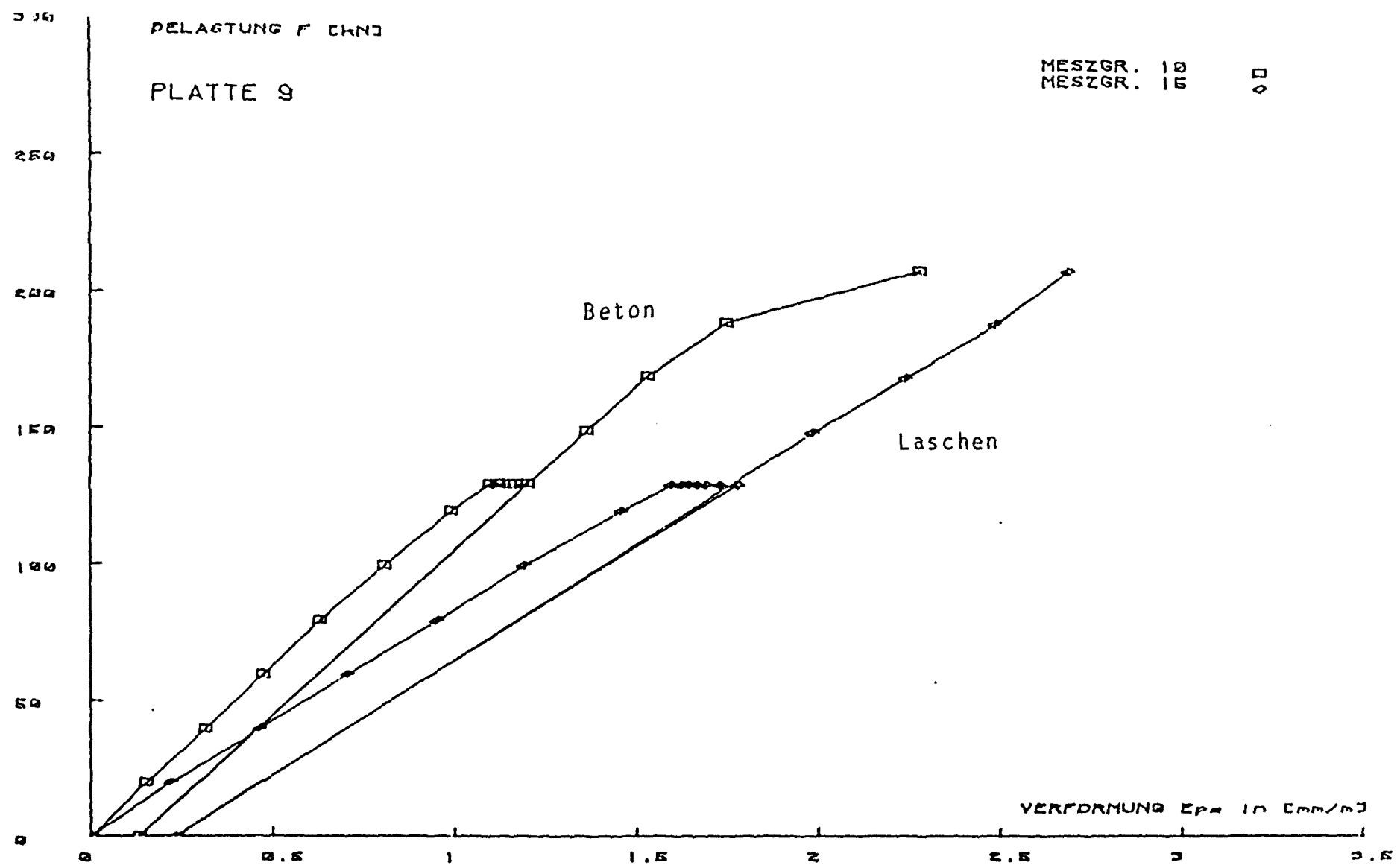


Bild 7.12.5: Mittlere Dehnungen des Betons und der Lasche in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 9

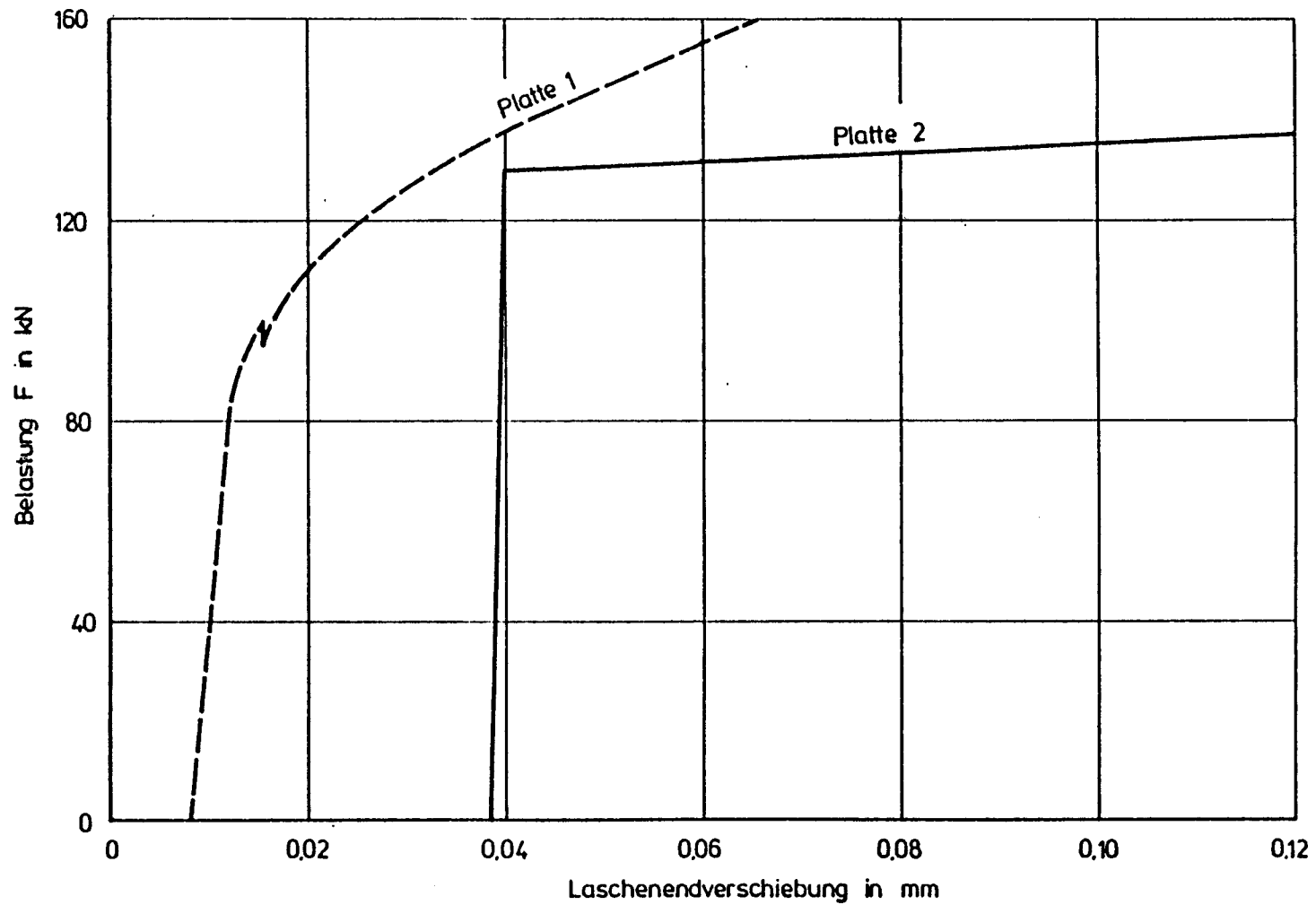


Bild 7.13.1: Maximale Endverschiebungen der Laschen im Bruchversuch in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 1 und 2

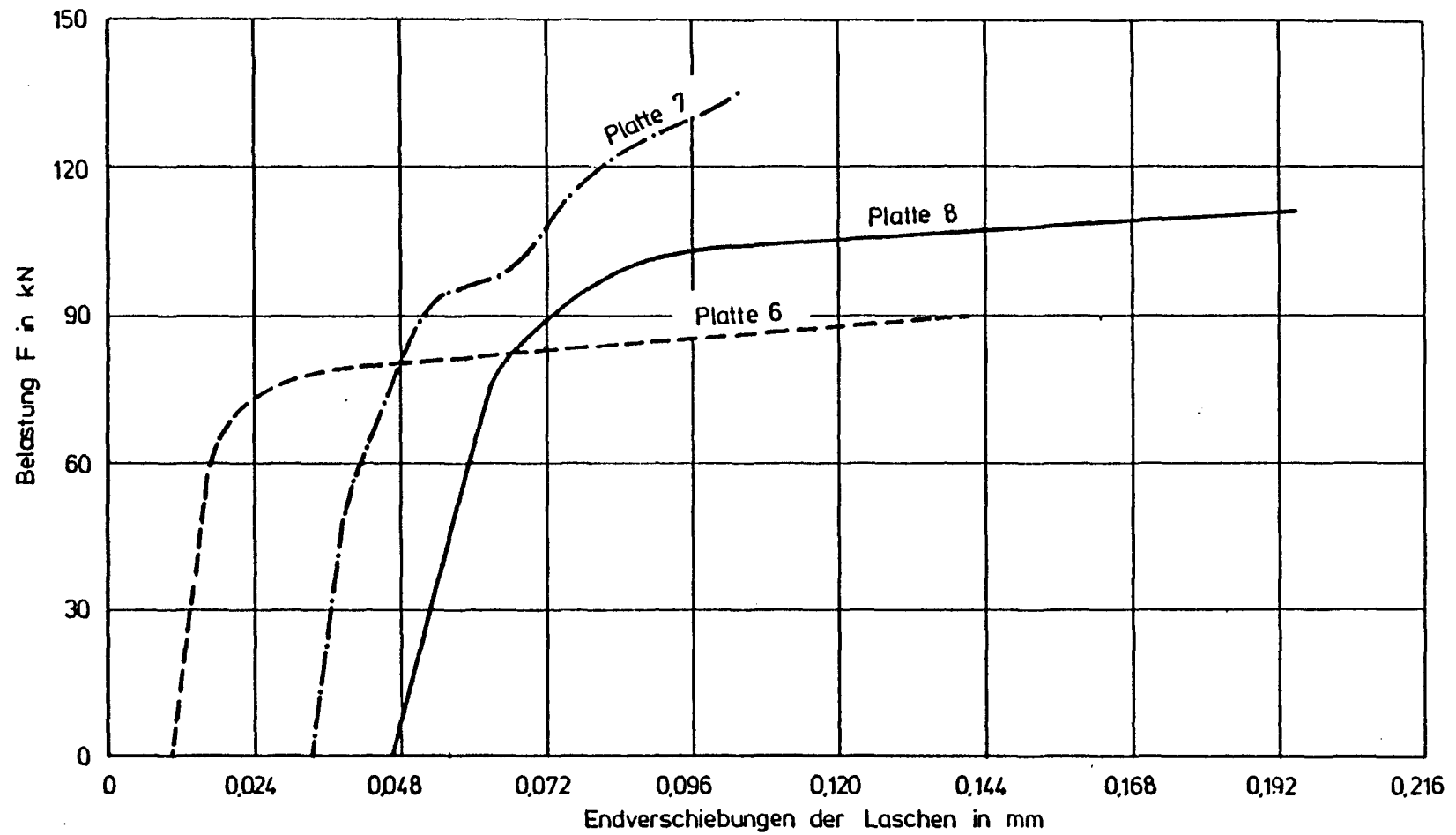


Bild 7.13.2: Maximale Endverschiebungen der Laschen im Bruchversuch in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 6, 7 und 8

## Platte 8

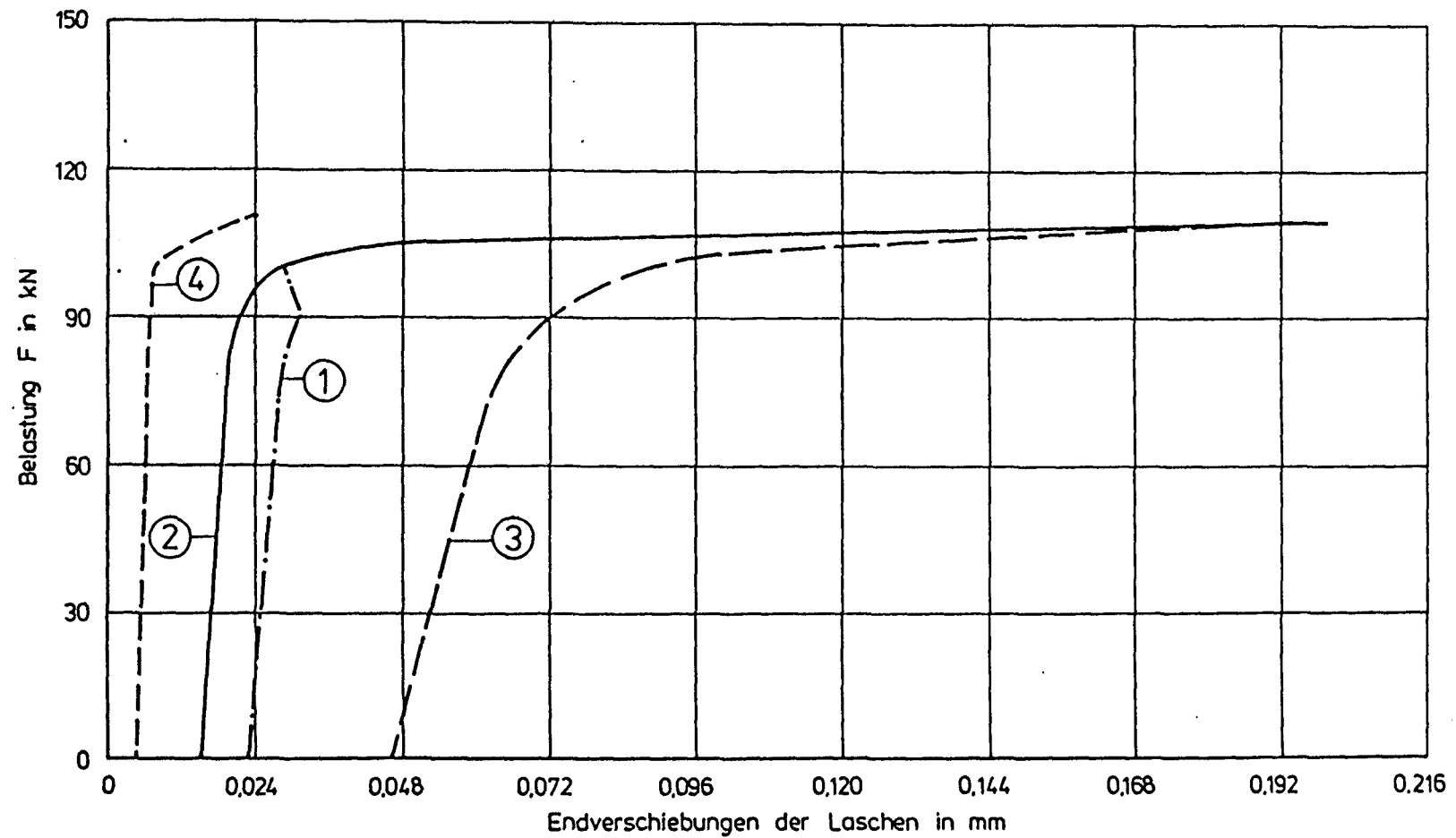


Bild 7.13.3: Endverschiebungen der Laschen im Bruchversuch  
in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 8

# Platte 9

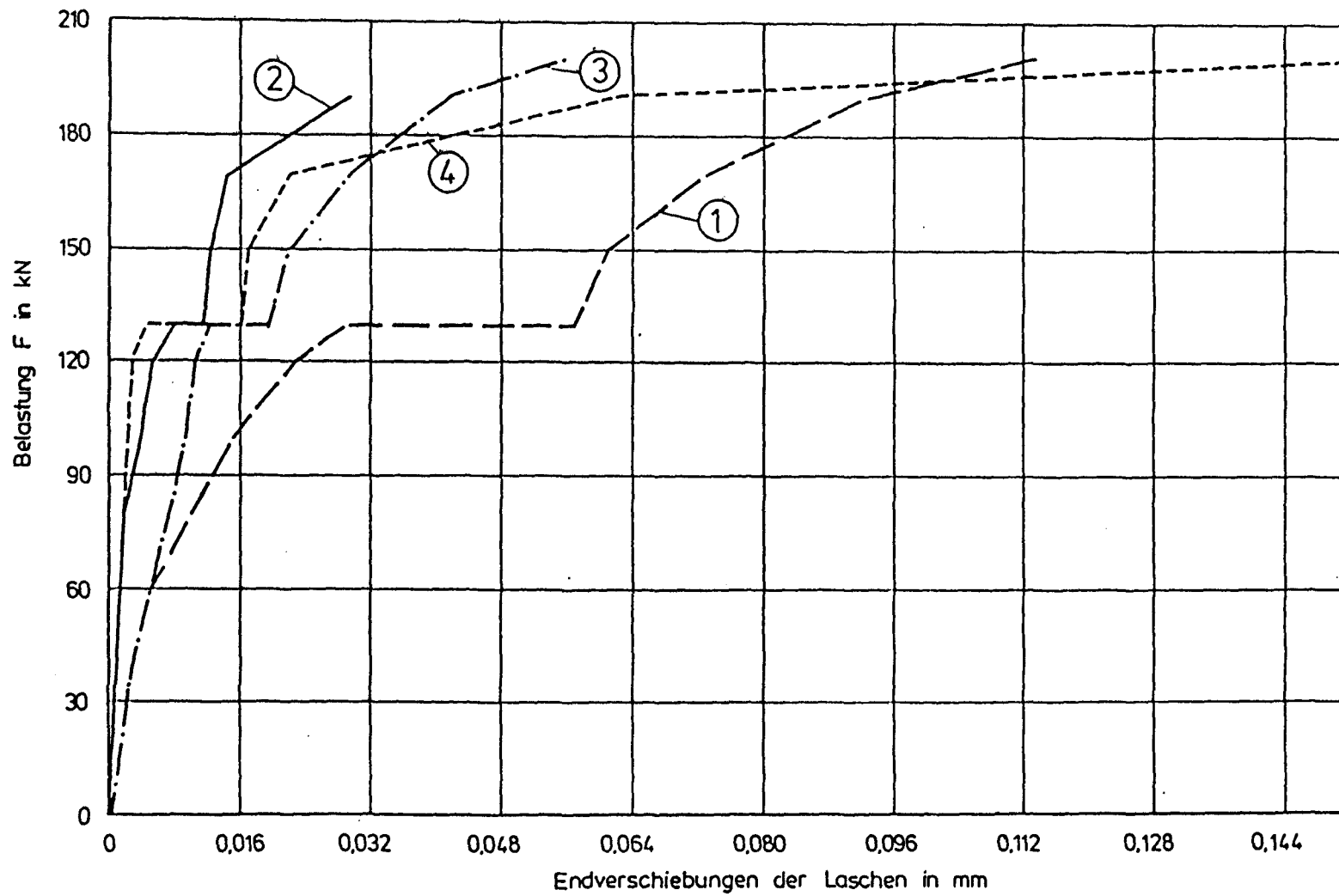


Bild 7.13.4: Endverschiebungen der Laschen in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 9

## Platte 1

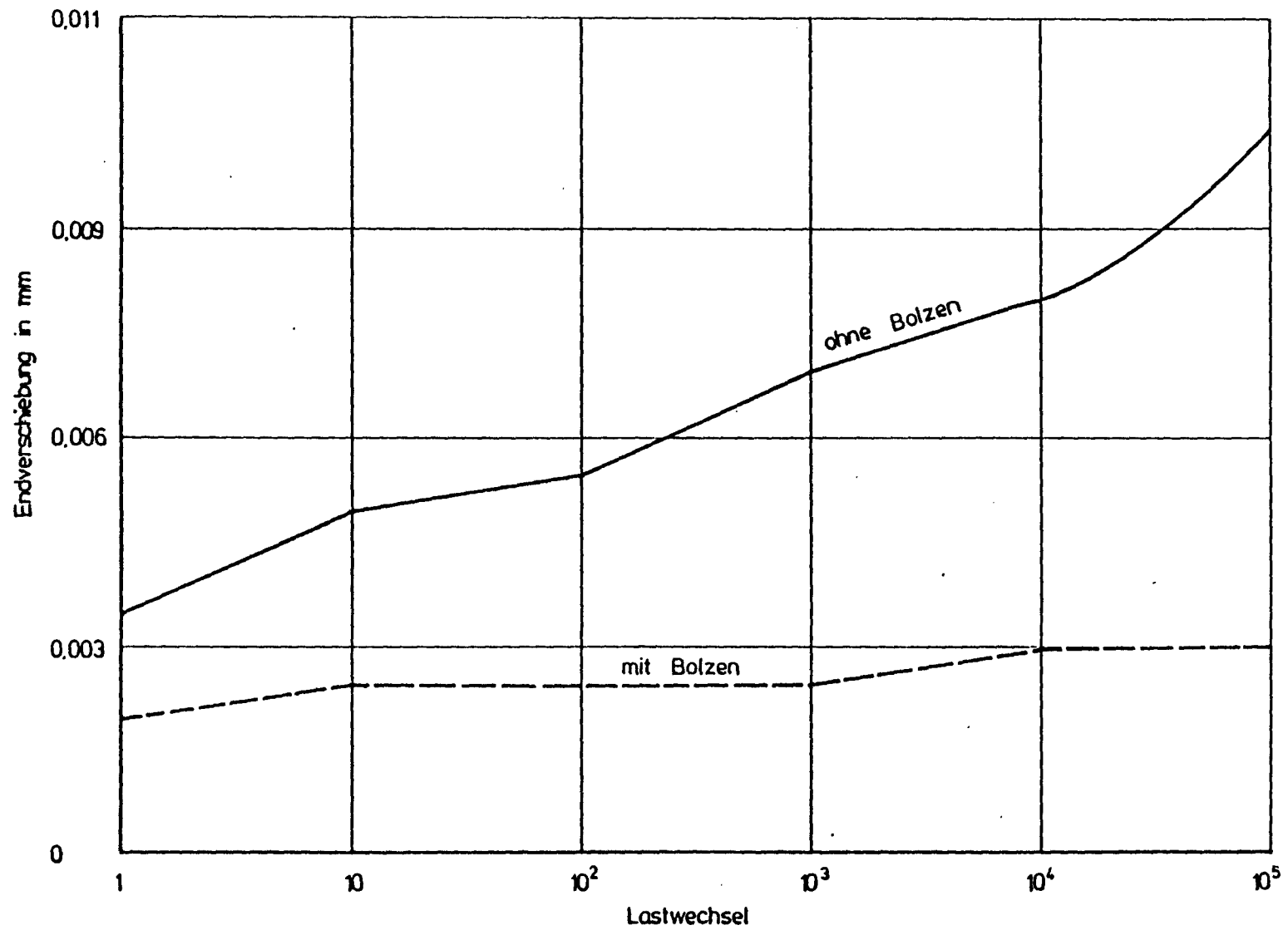


Bild 7.14.1: Endverschiebungen der Laschen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 1

## Platte 2

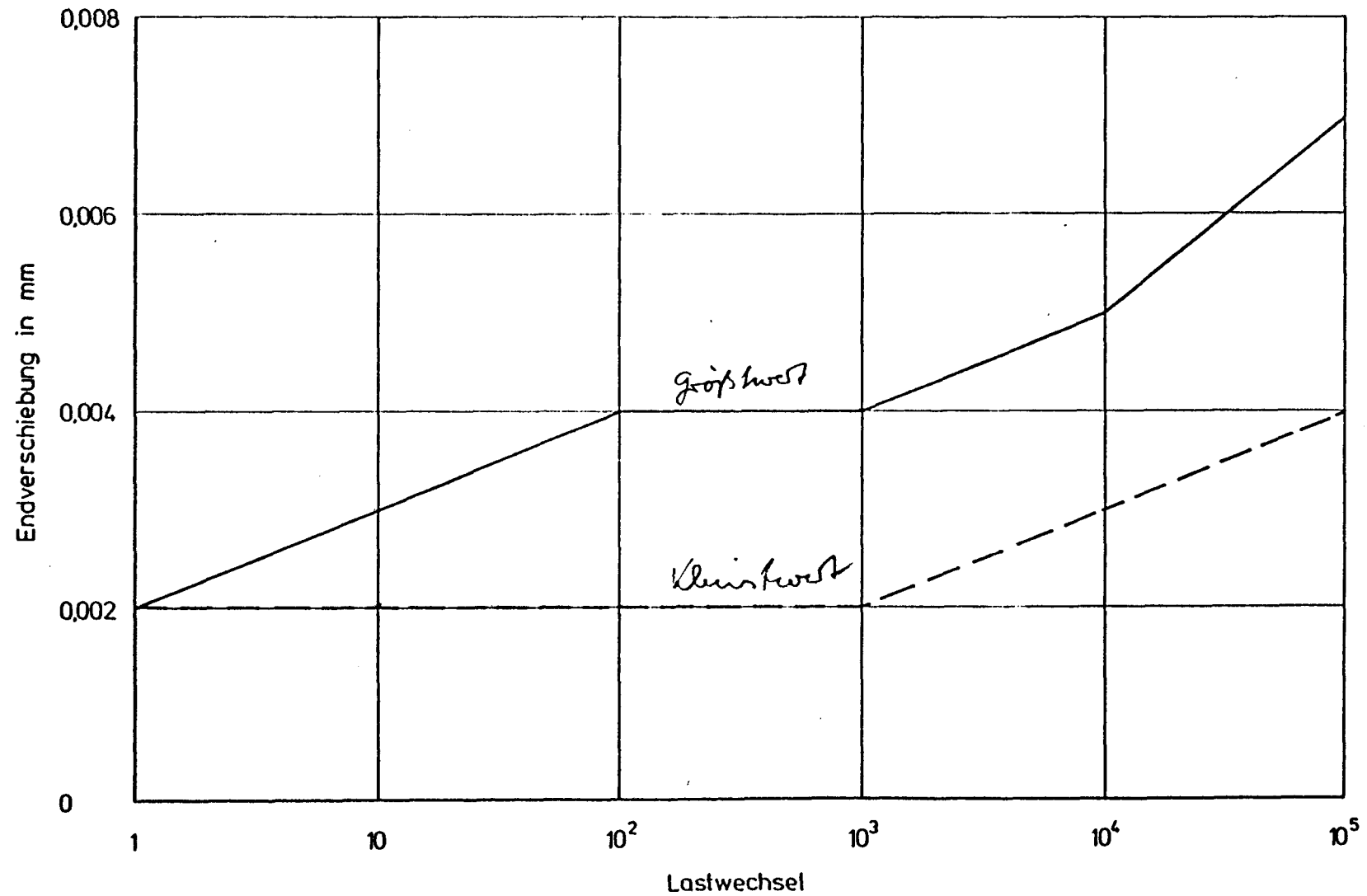


Bild 7.14.2: Endverschiebungen der Laschen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 2



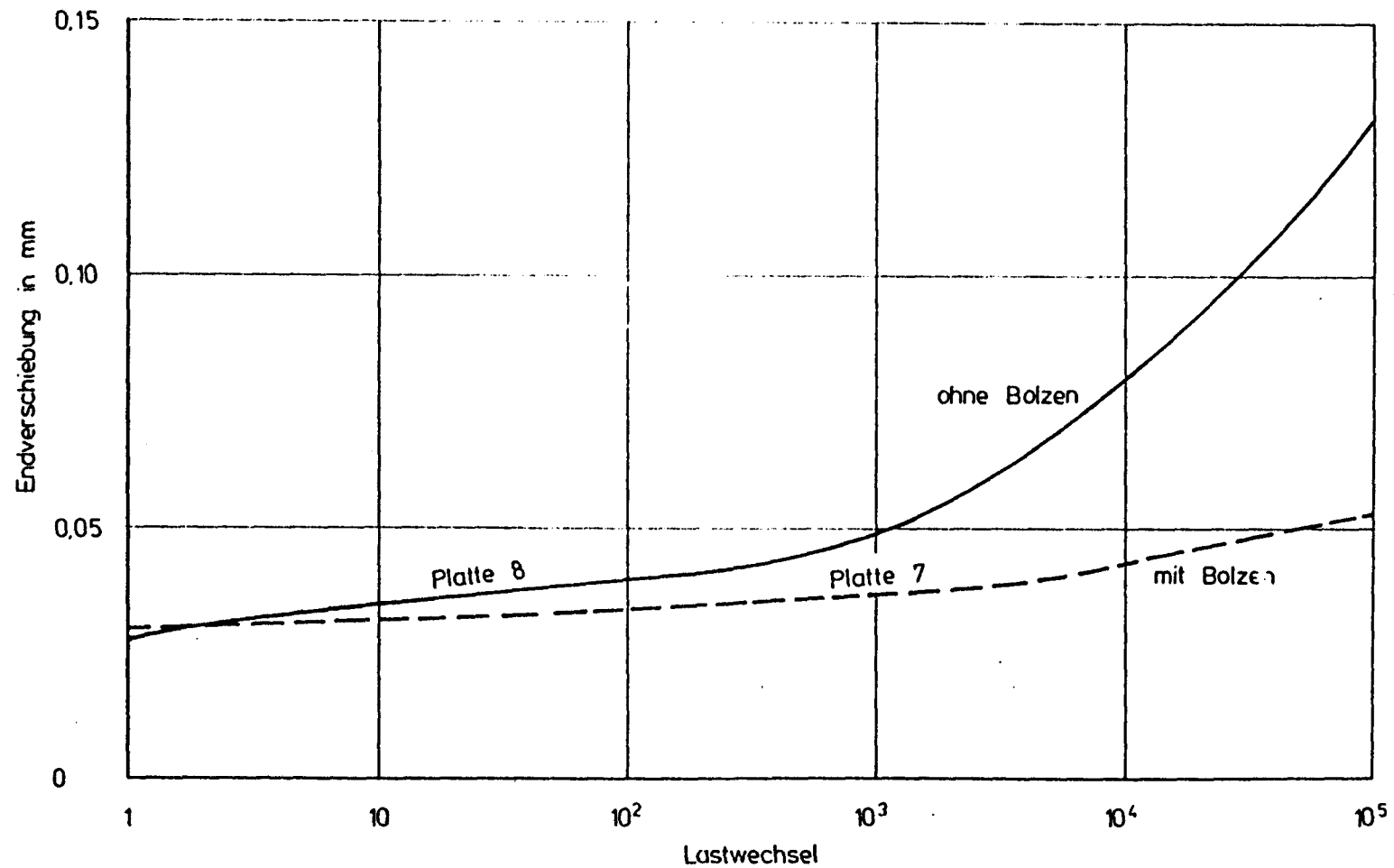
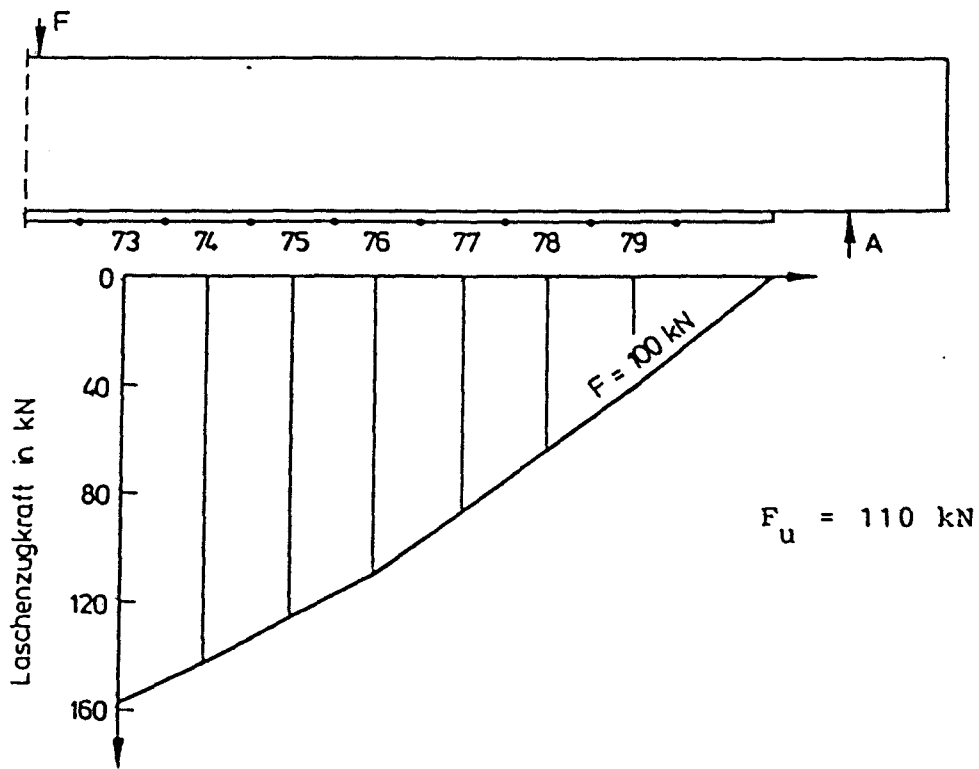
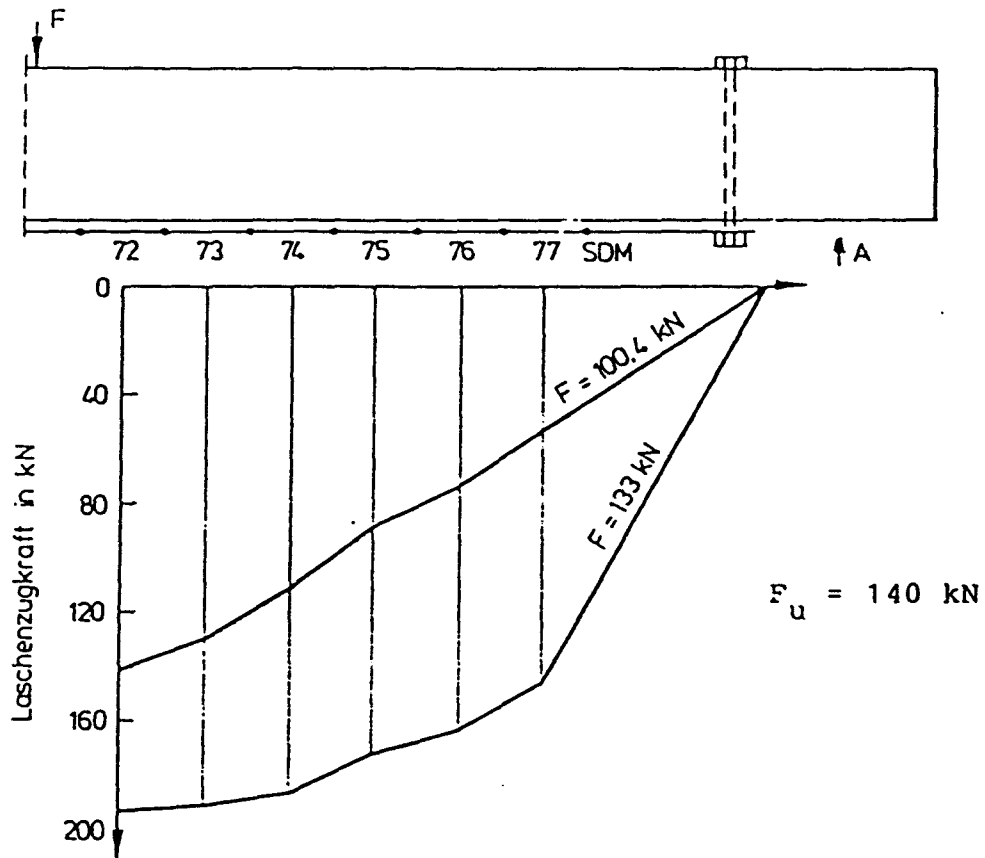


Bild 7.14.3: Endverschiebungen der Laschen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 7 und 8

## Platte 7



## Platte 8

Bild 7.15.1: Zugkraftlinien bei Endverankerung mit und ohne Bolzen (Platte 7 und 8)

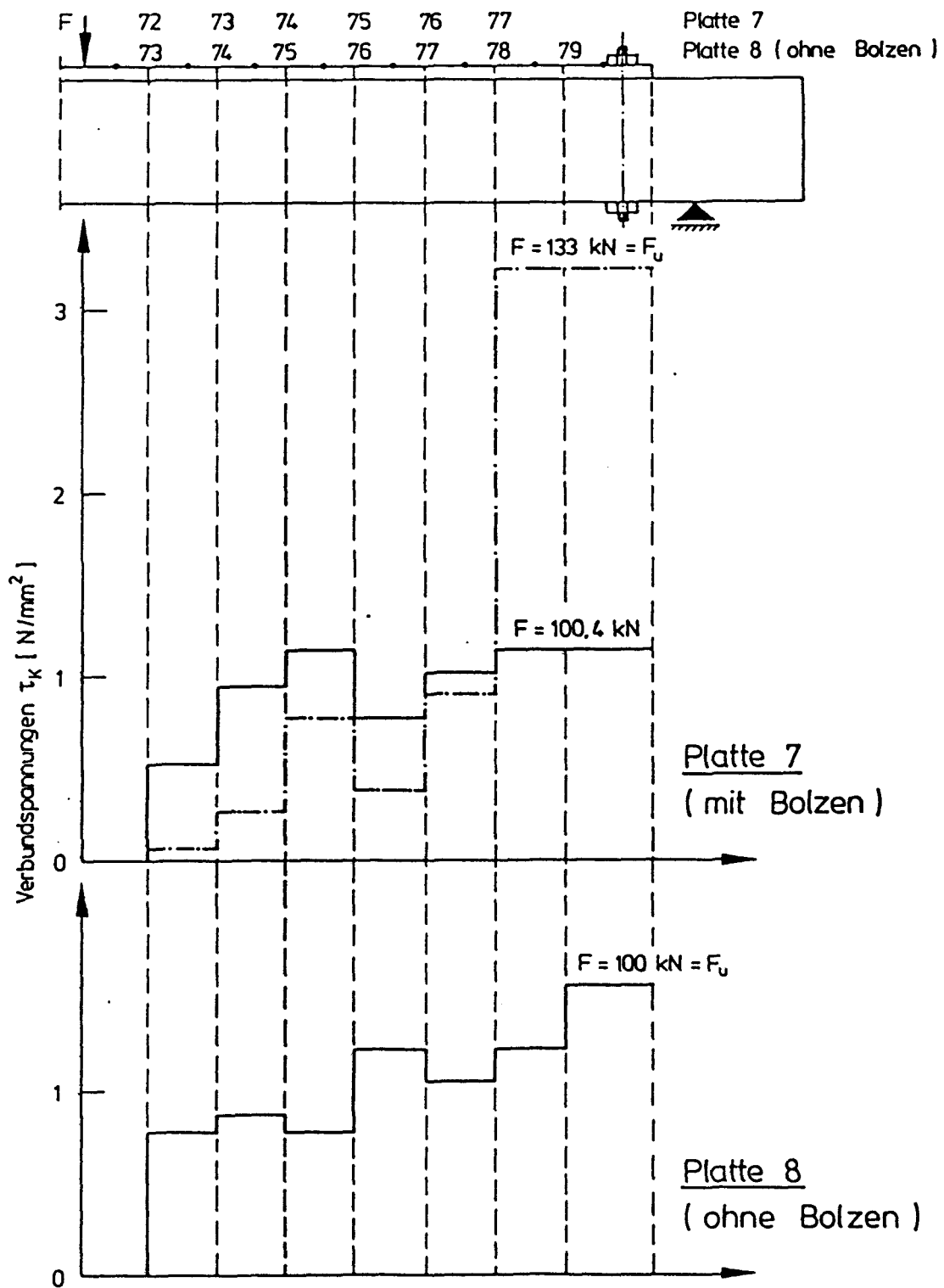


Bild 7.15.2: Verbundspannungen bei Endverankerung mit und ohne Bolzen (Platte 7 und 8)

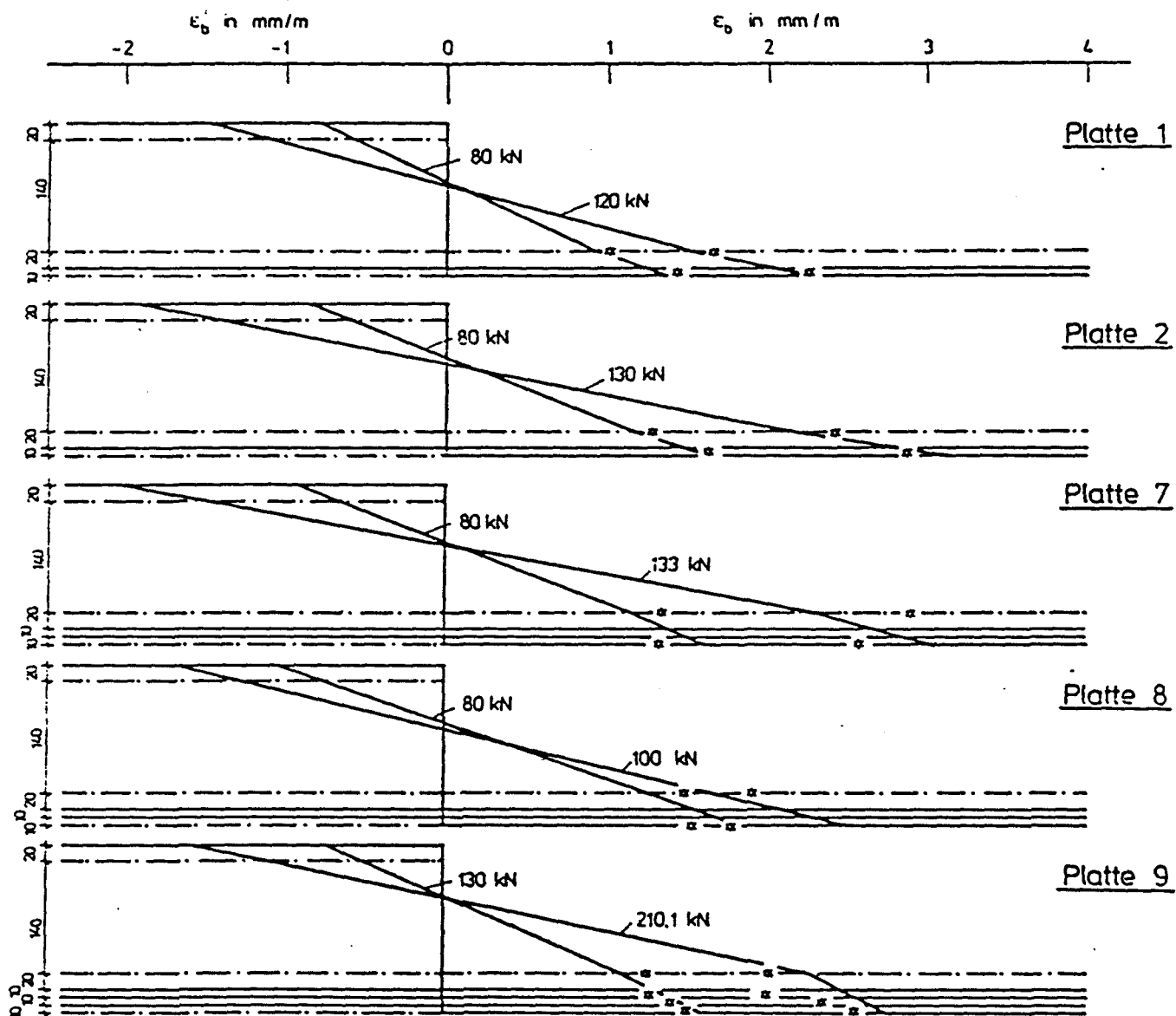


Bild 7.16 : Dehnungszustände unter Oberlast und in Bruchnähe bei den kurzen Platten

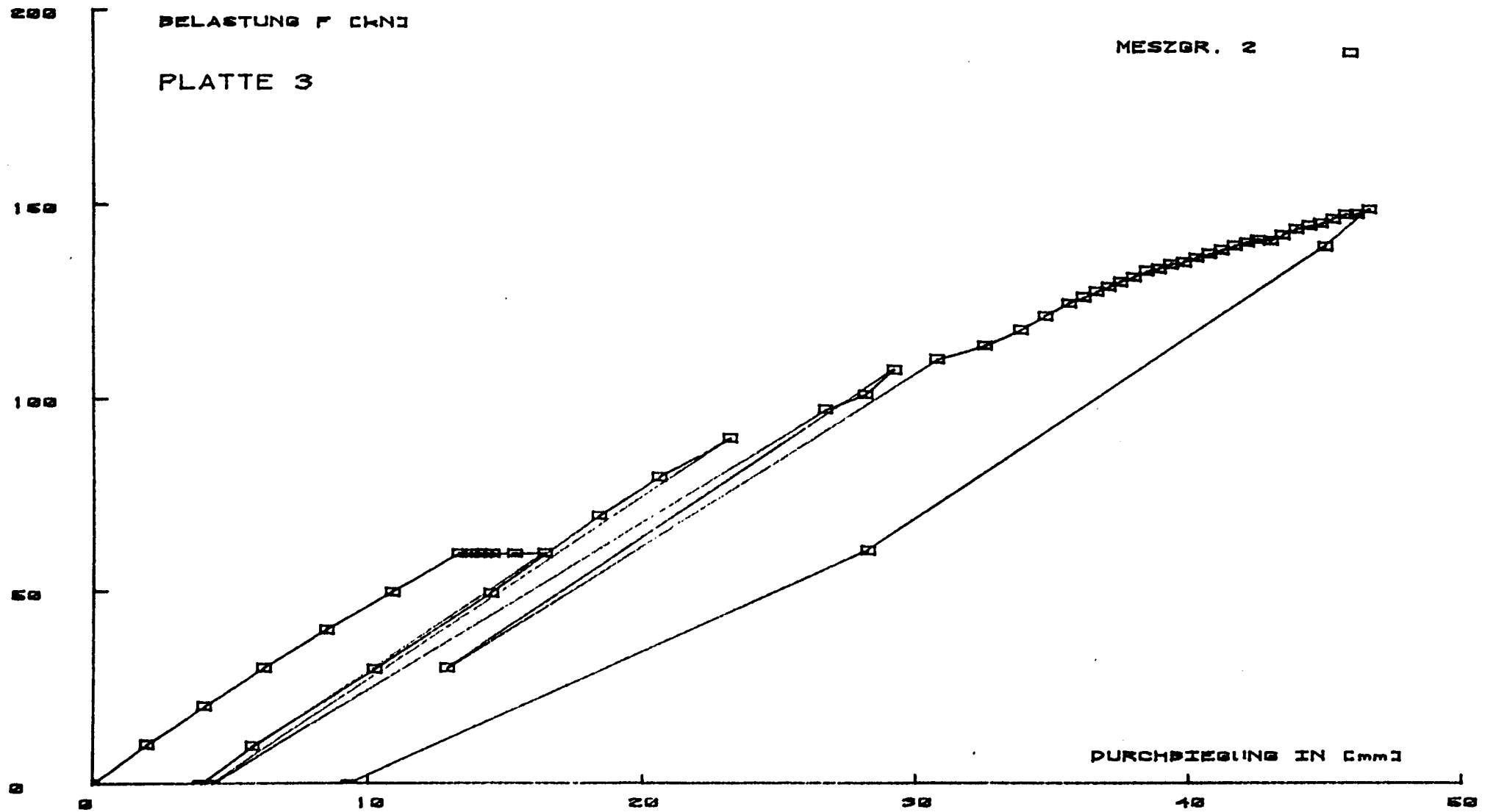


Bild 8.1.1: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 3

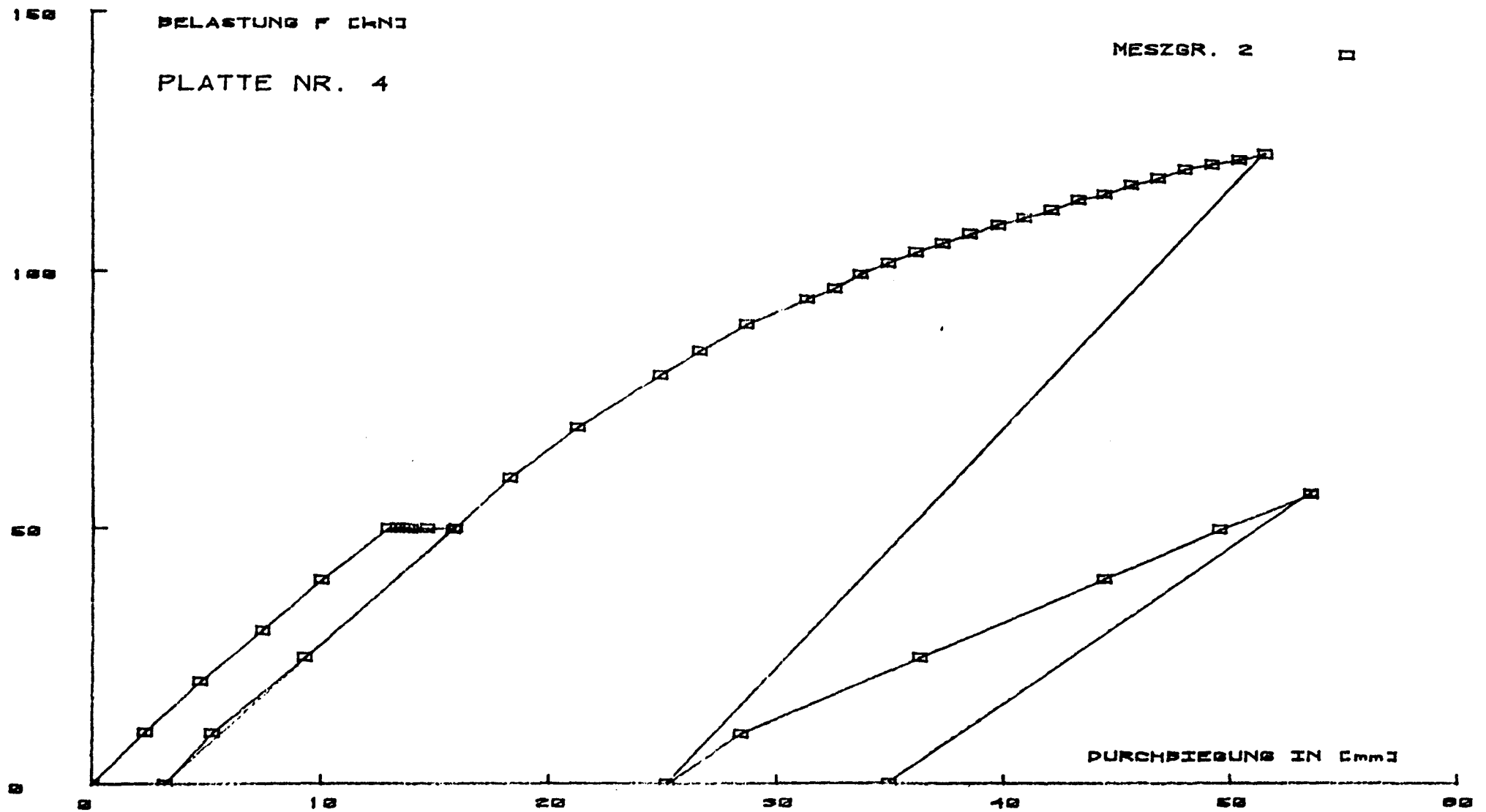


Bild 8.1.2: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung  
bei Platte 4

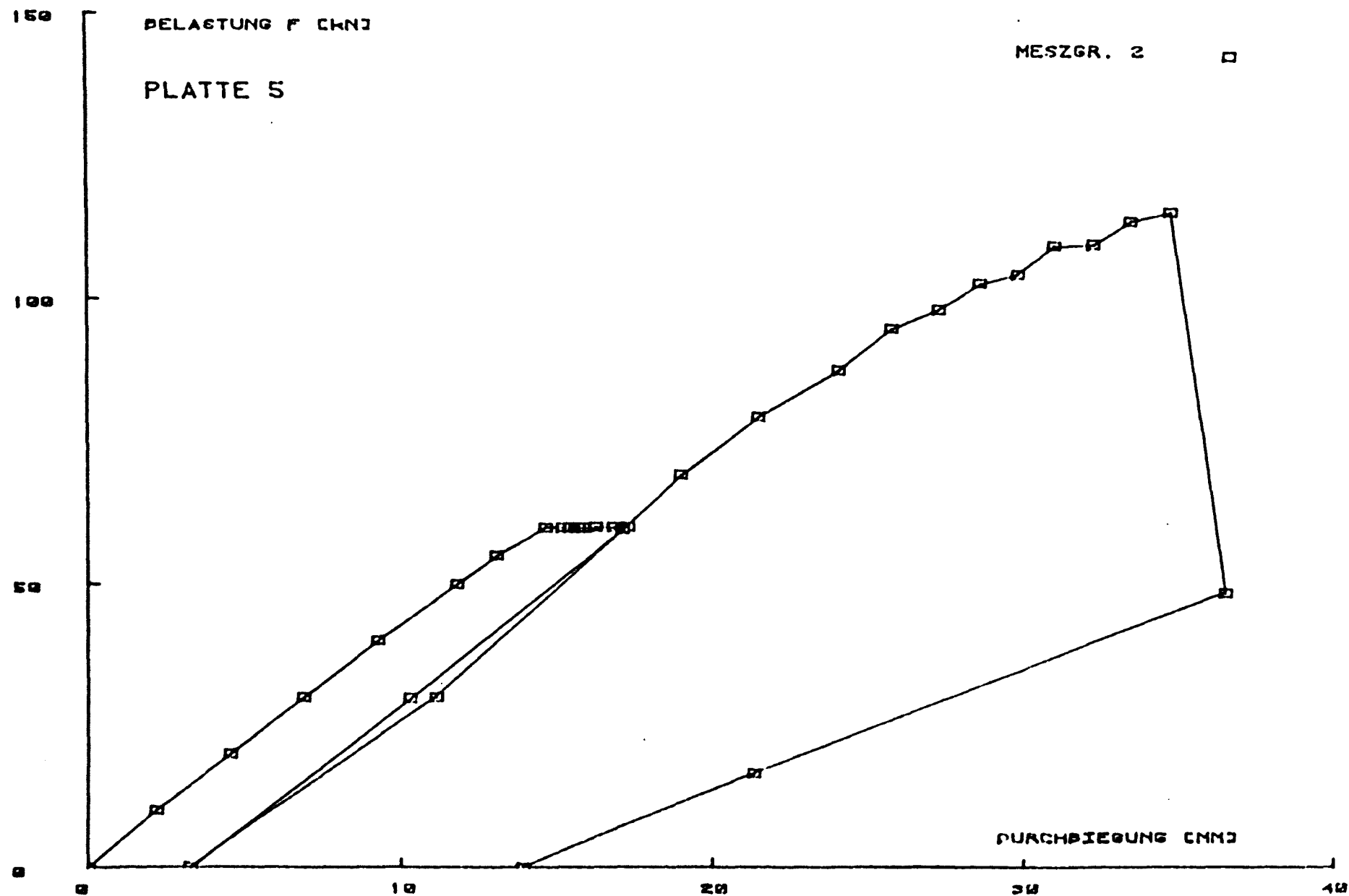


Bild 8.1.3: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung  
bei Platte 5

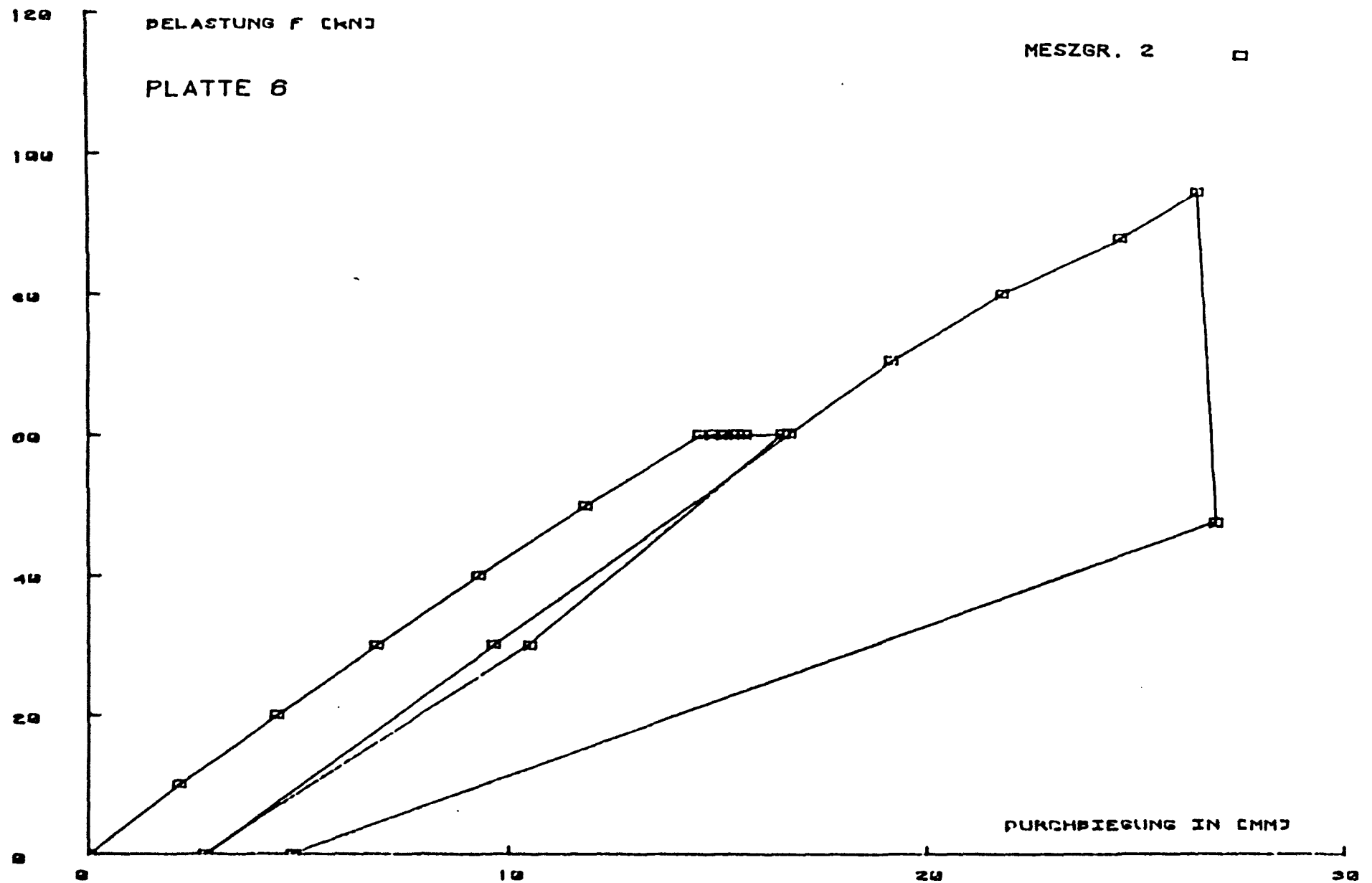
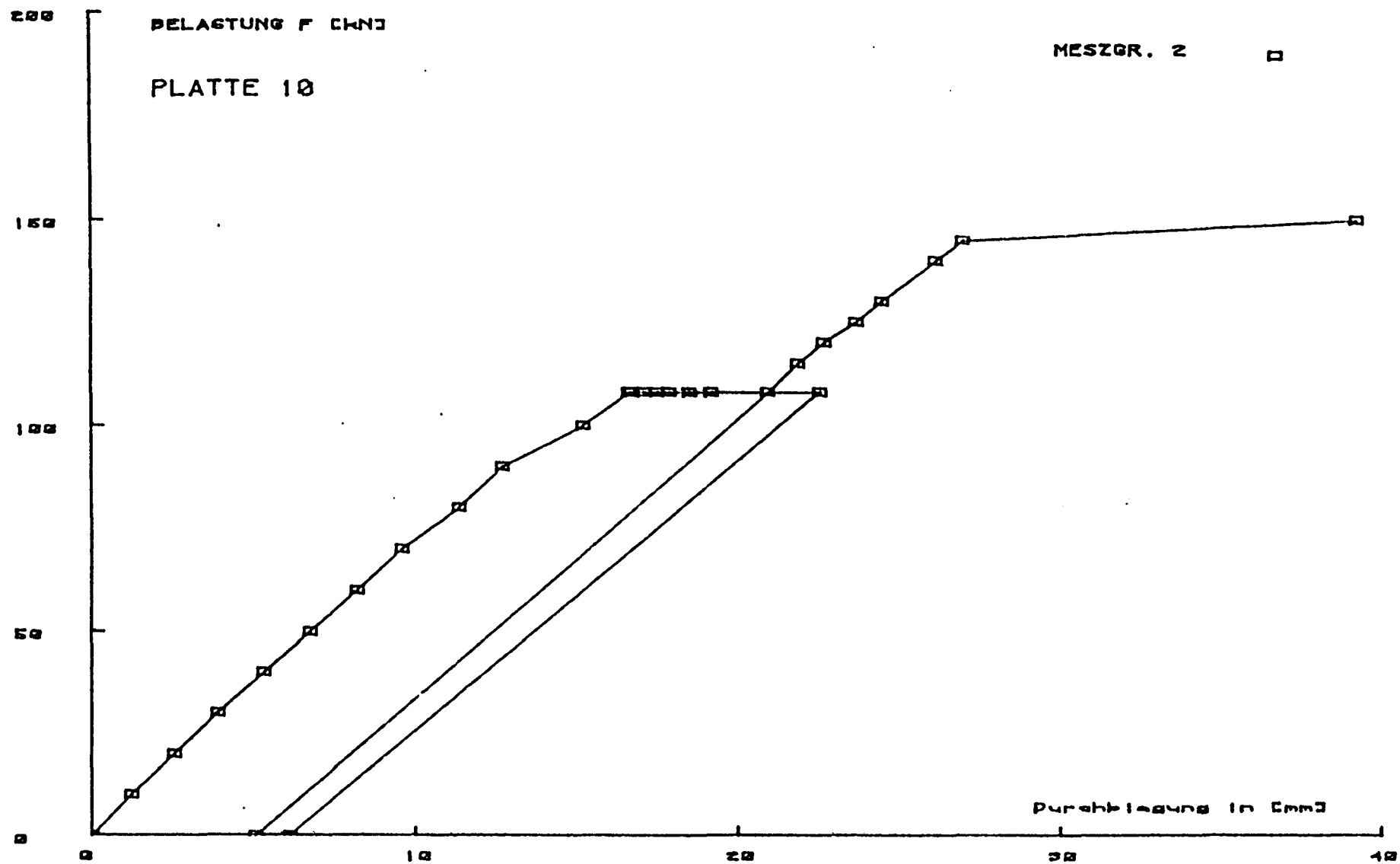


Bild 8.1.4: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung  
bei Platte 6





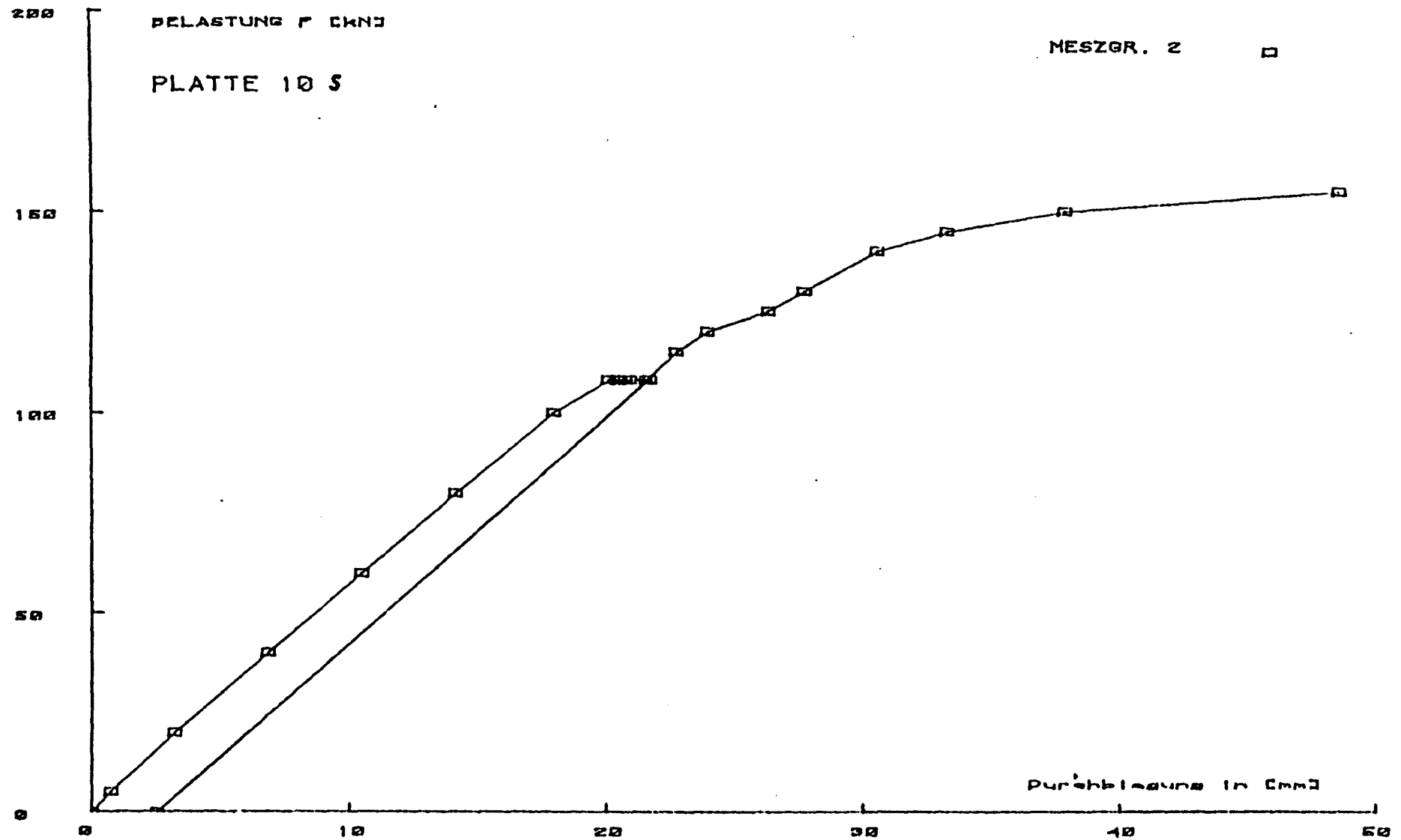


Bild 8.1.6: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung  
bei Platte 10 S

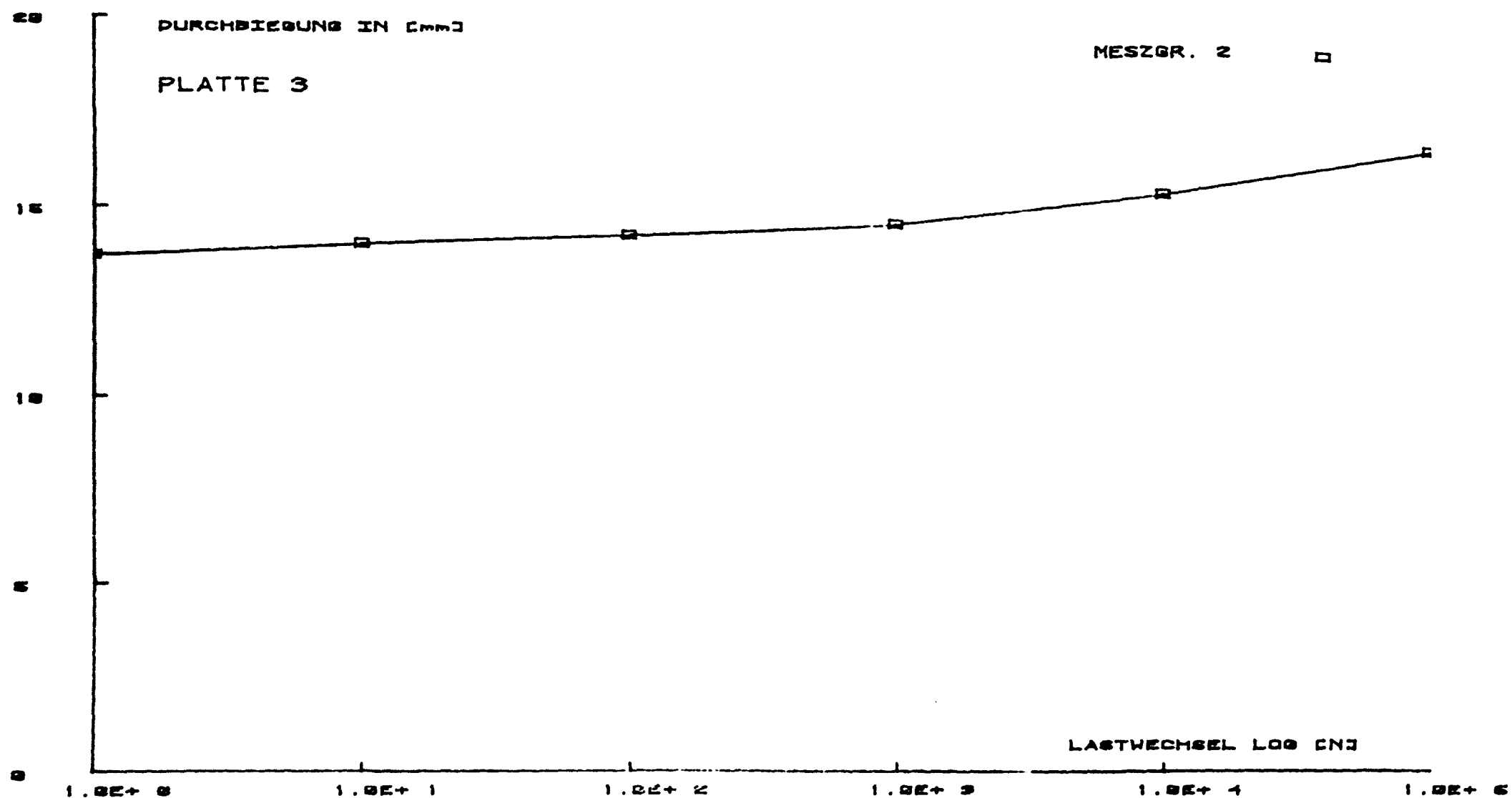


Bild 8.2.1: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 3

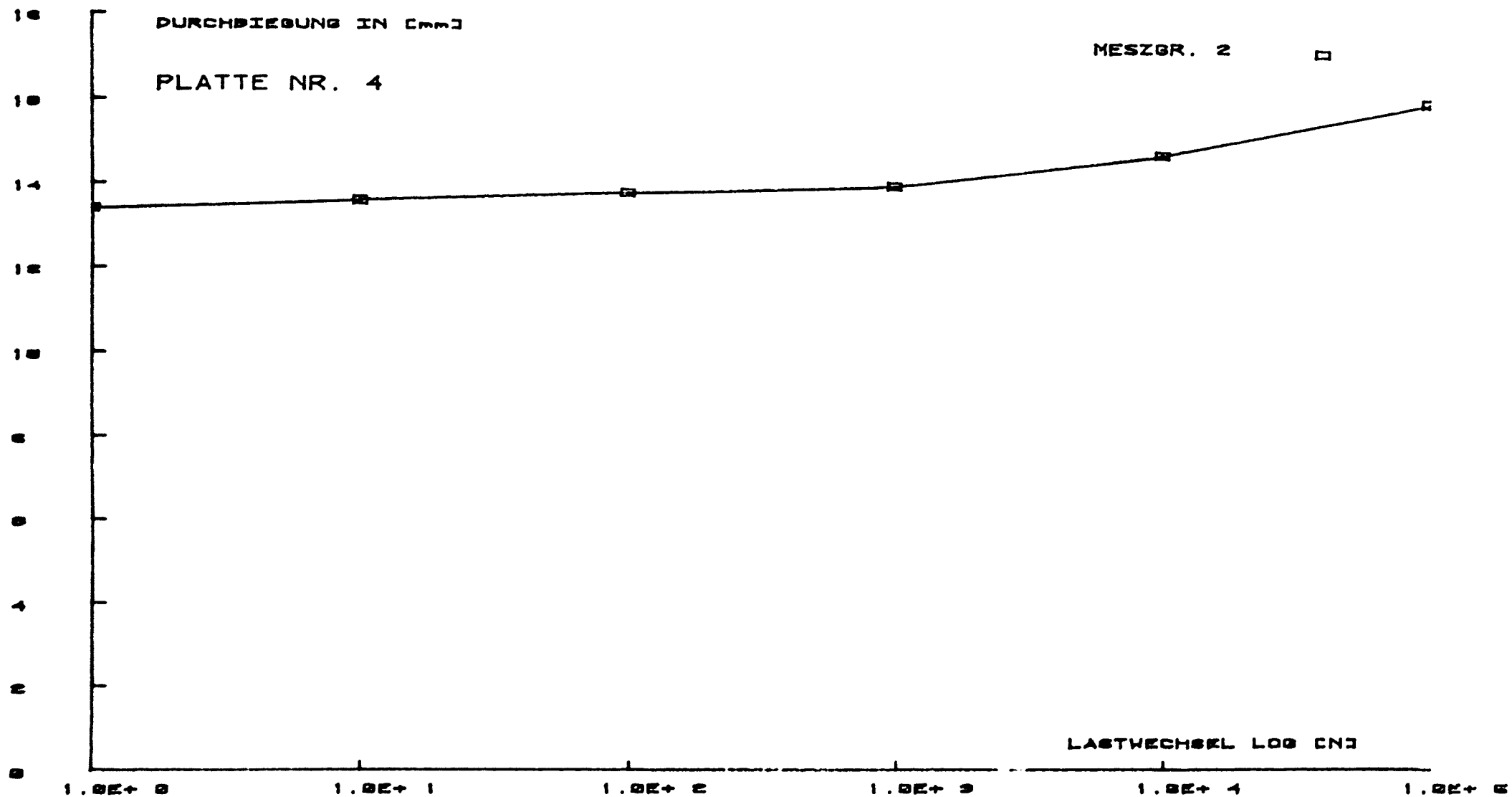


Bild 8.2.2: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 4

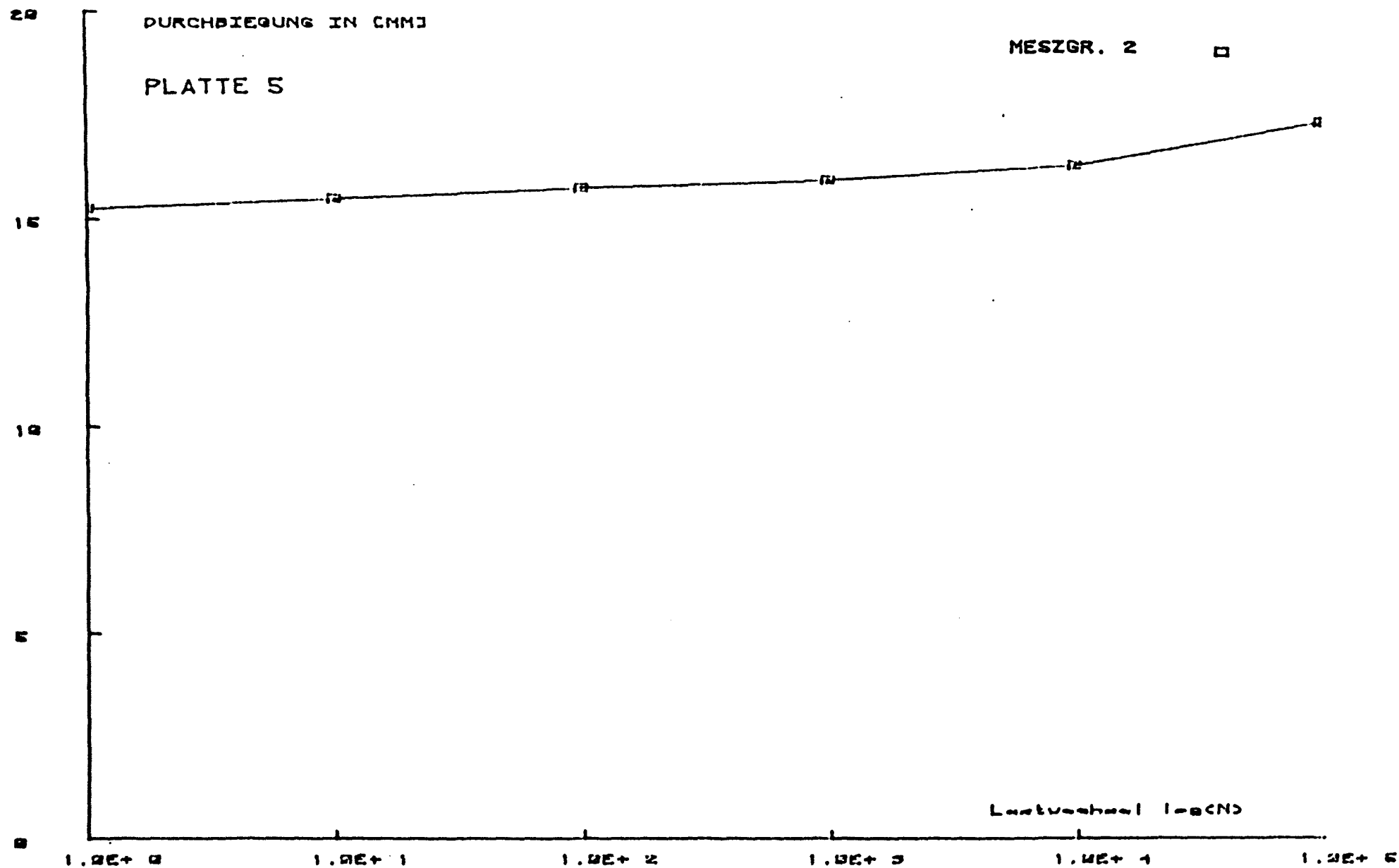


Bild 8.2.3: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 5

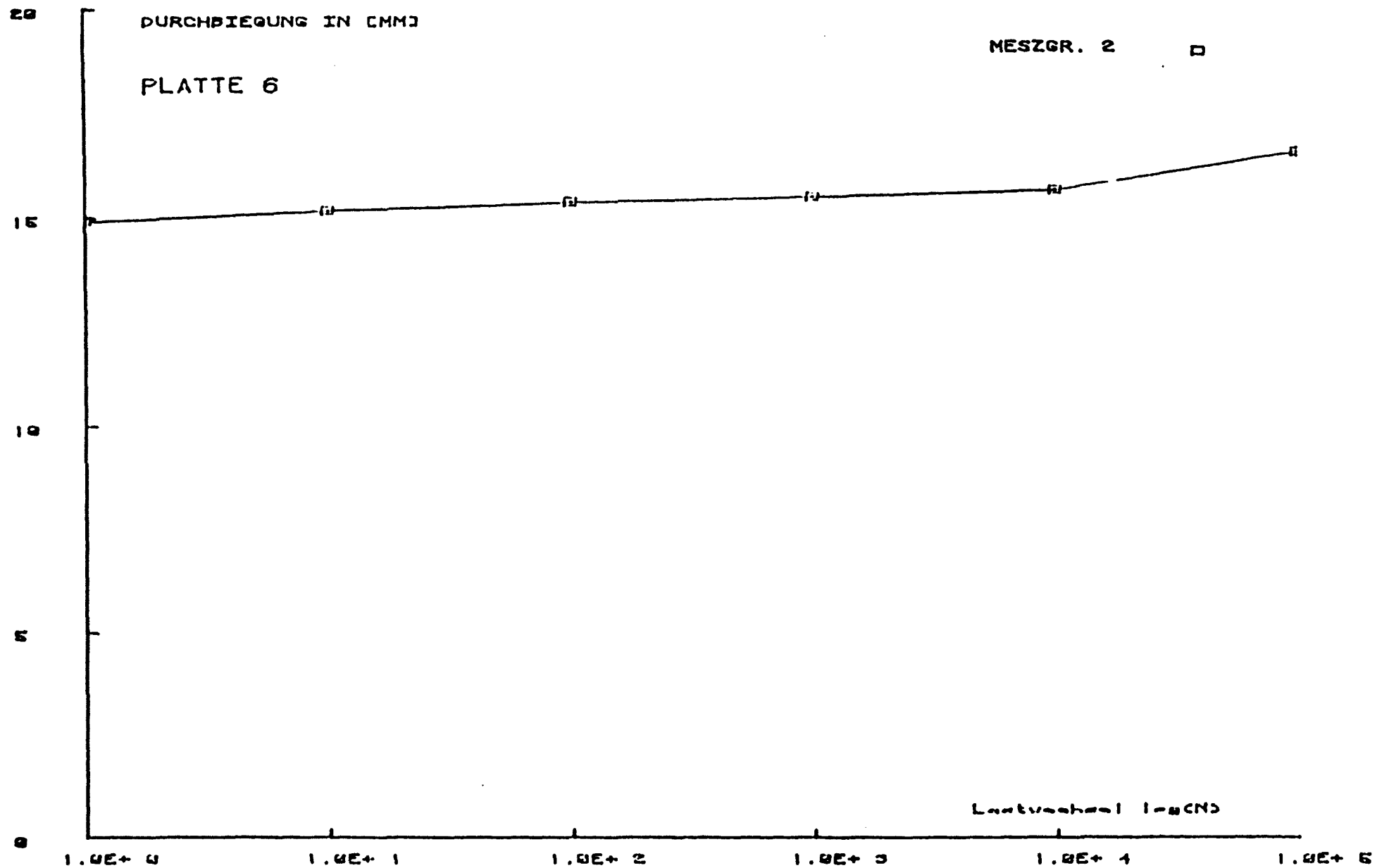


Bild 8.2.4: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 6

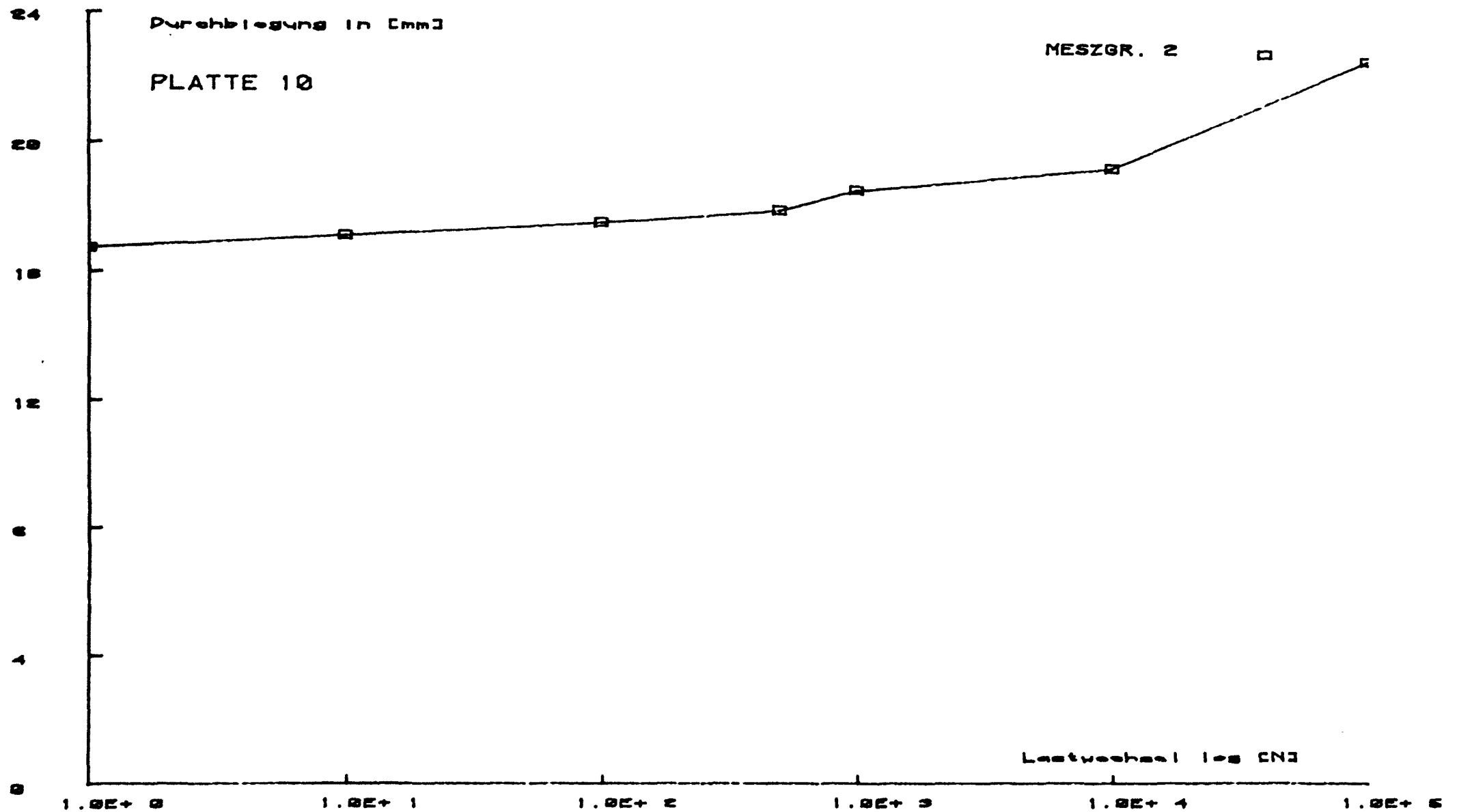
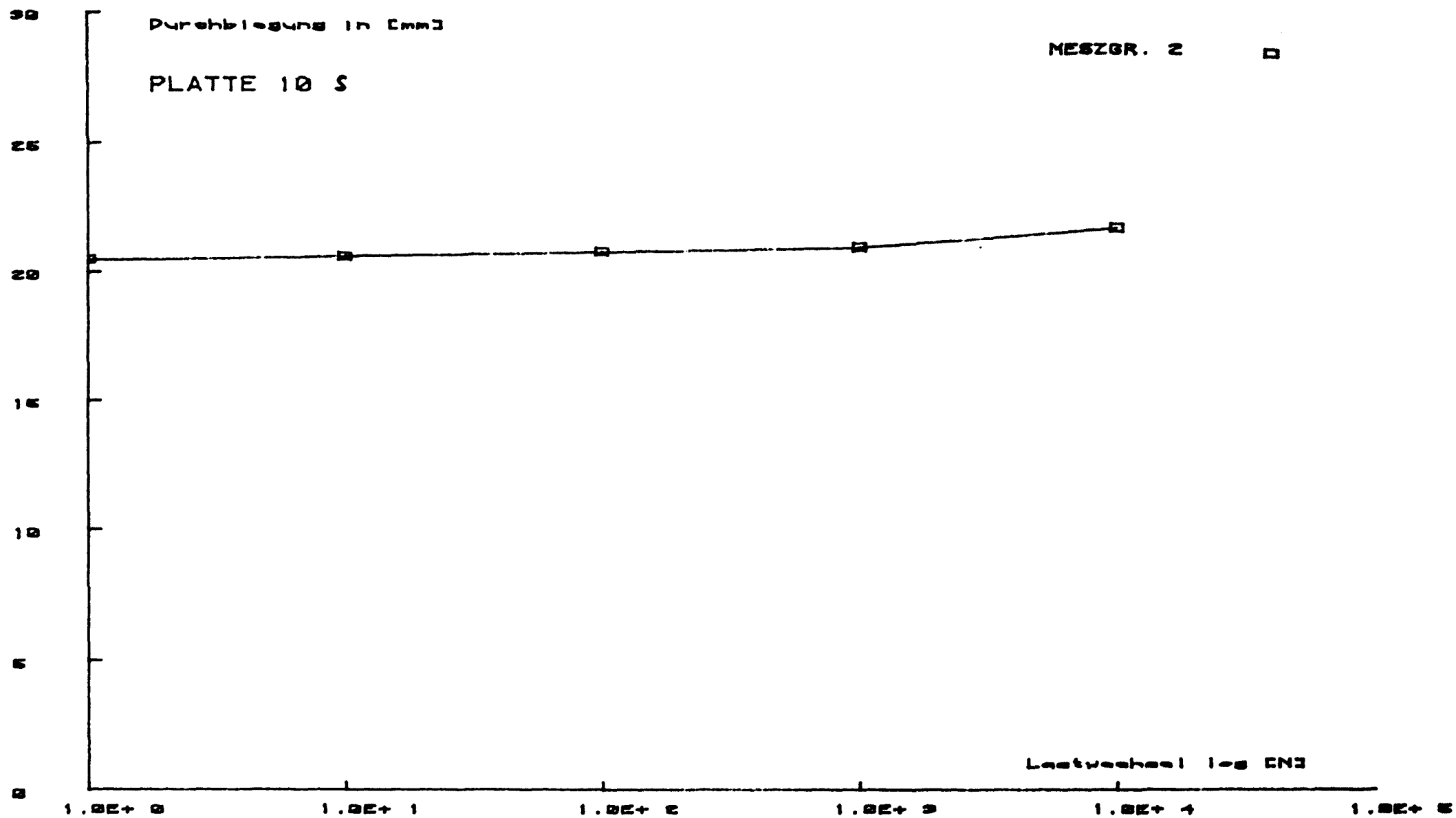


Bild 8.2.5: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 10





# Platte 3

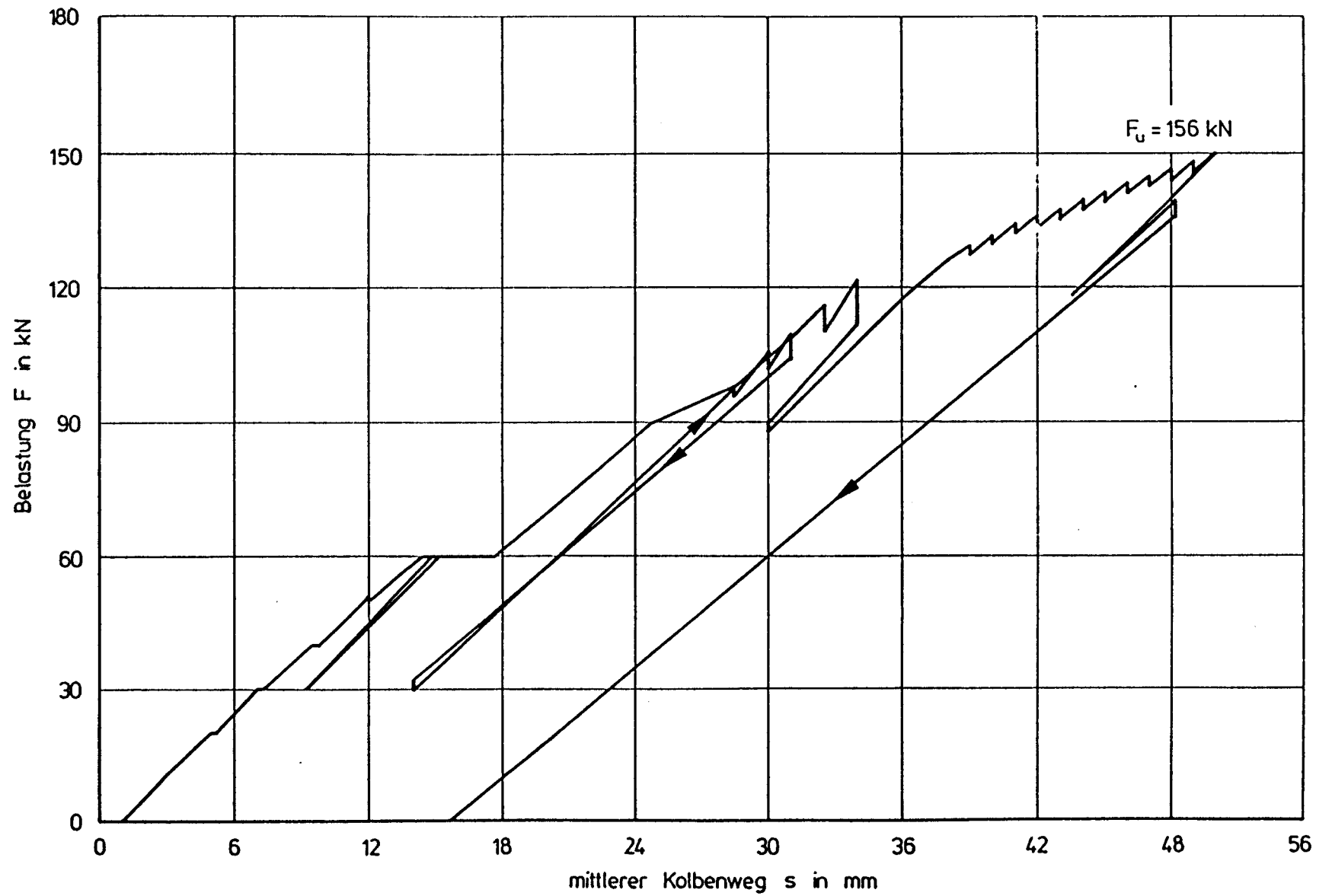


Bild 8.3.1: Kolbenweg in Abhängigkeit von der Last bei Platte 3

## Platte 4

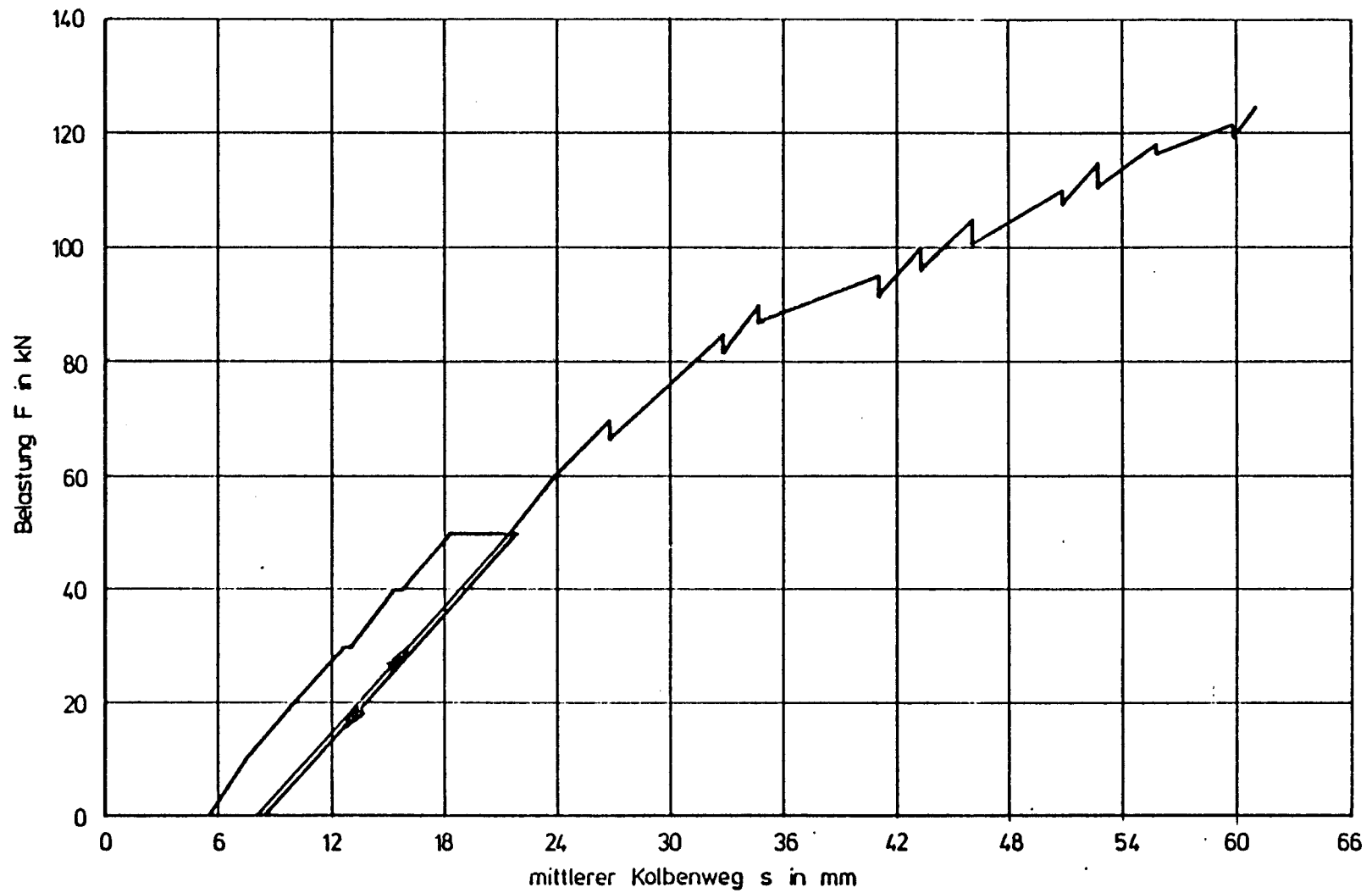


Bild 8.3.2: Kolbenweg in Abhängigkeit von der Last bei Platte 4

## Platte 5

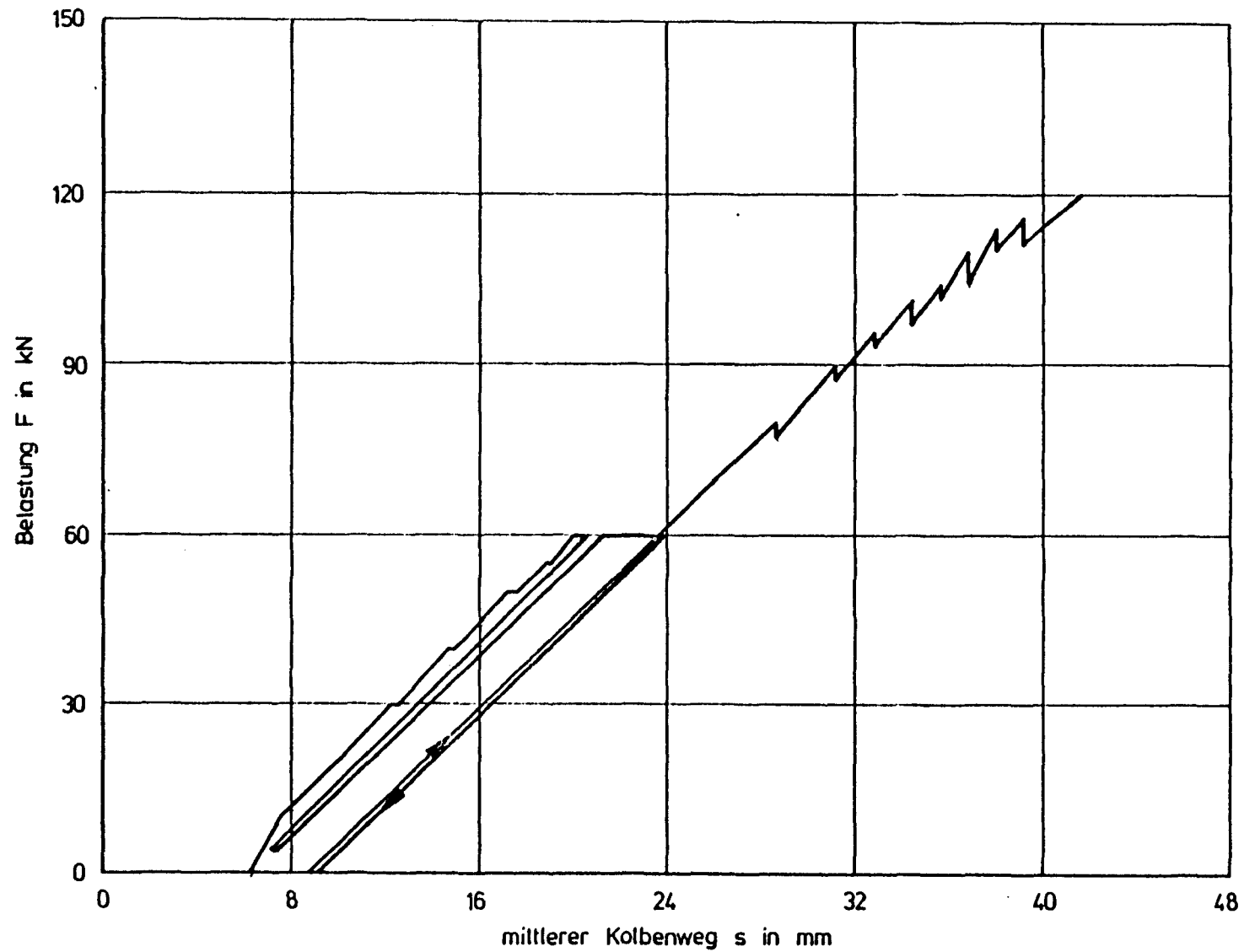


Bild 8.3.3: Kolbenweg in Abhängigkeit von der Last bei Platte 5

## Platte 6

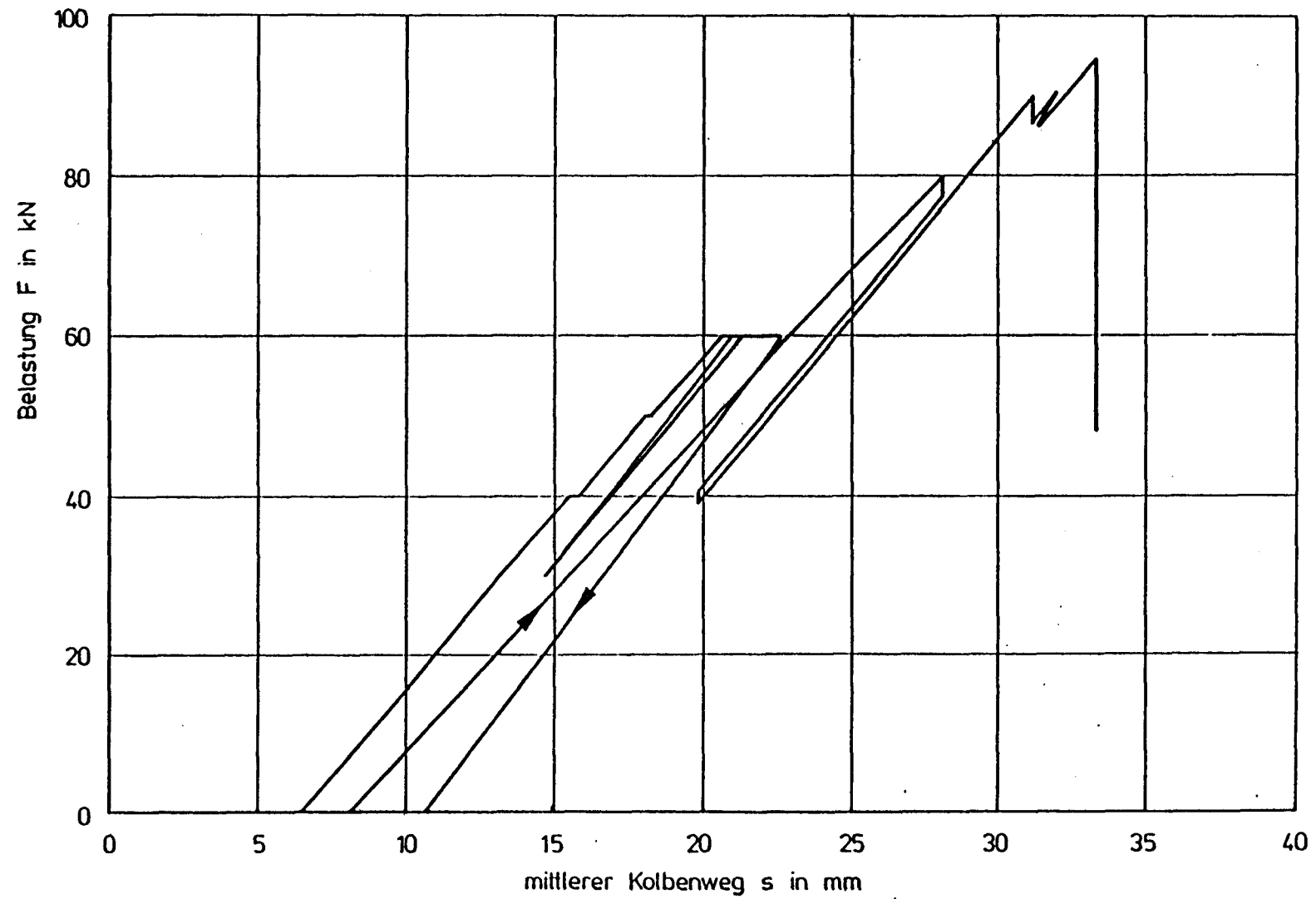


Bild 8.3.4: Kolbenweg in Abhängigkeit von der Last bei Platte 6

## Platte 10

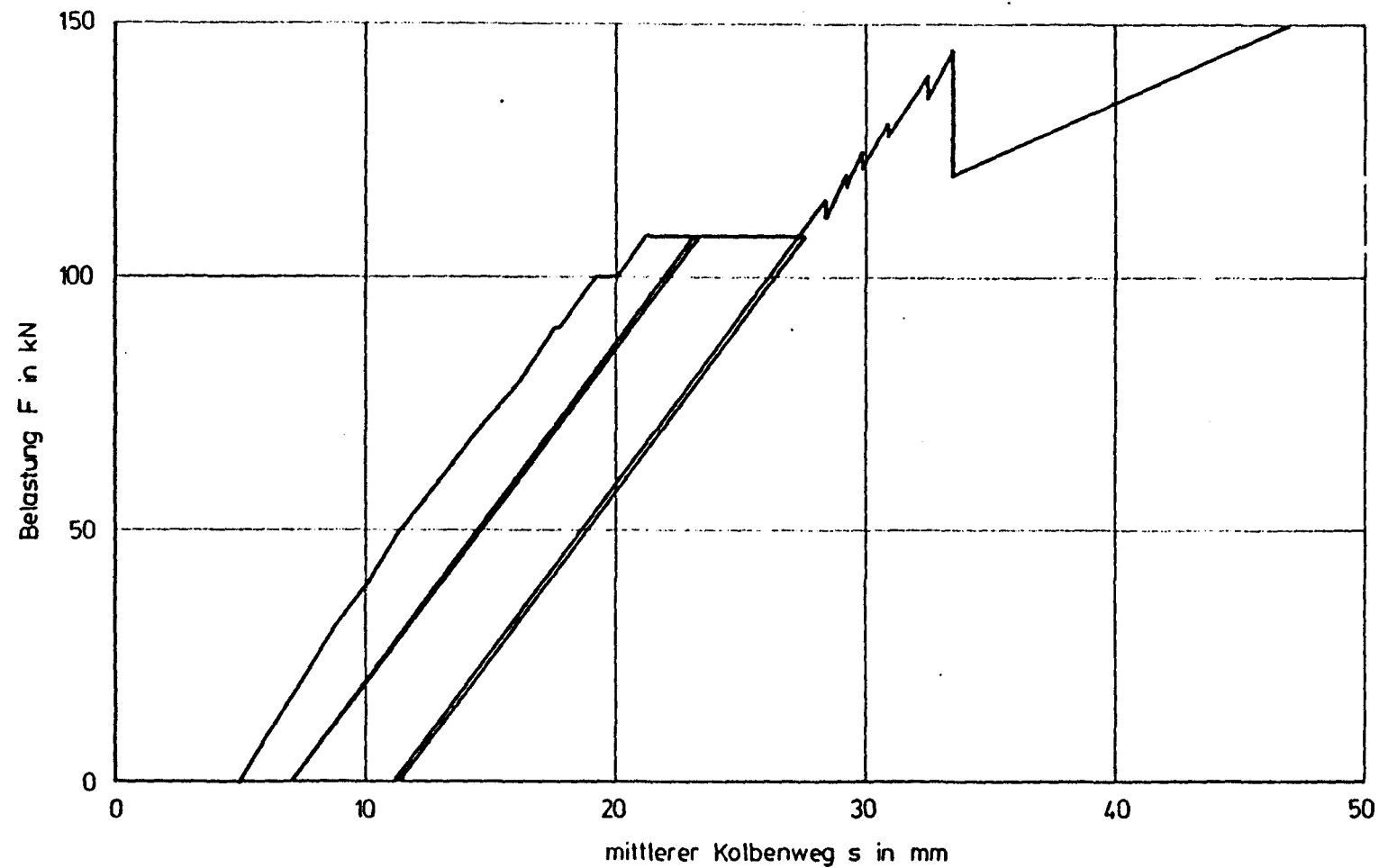


Bild 8.3.5: Kolbenweg in Abhängigkeit von der Last bei Platte 10

### Platte 10 S

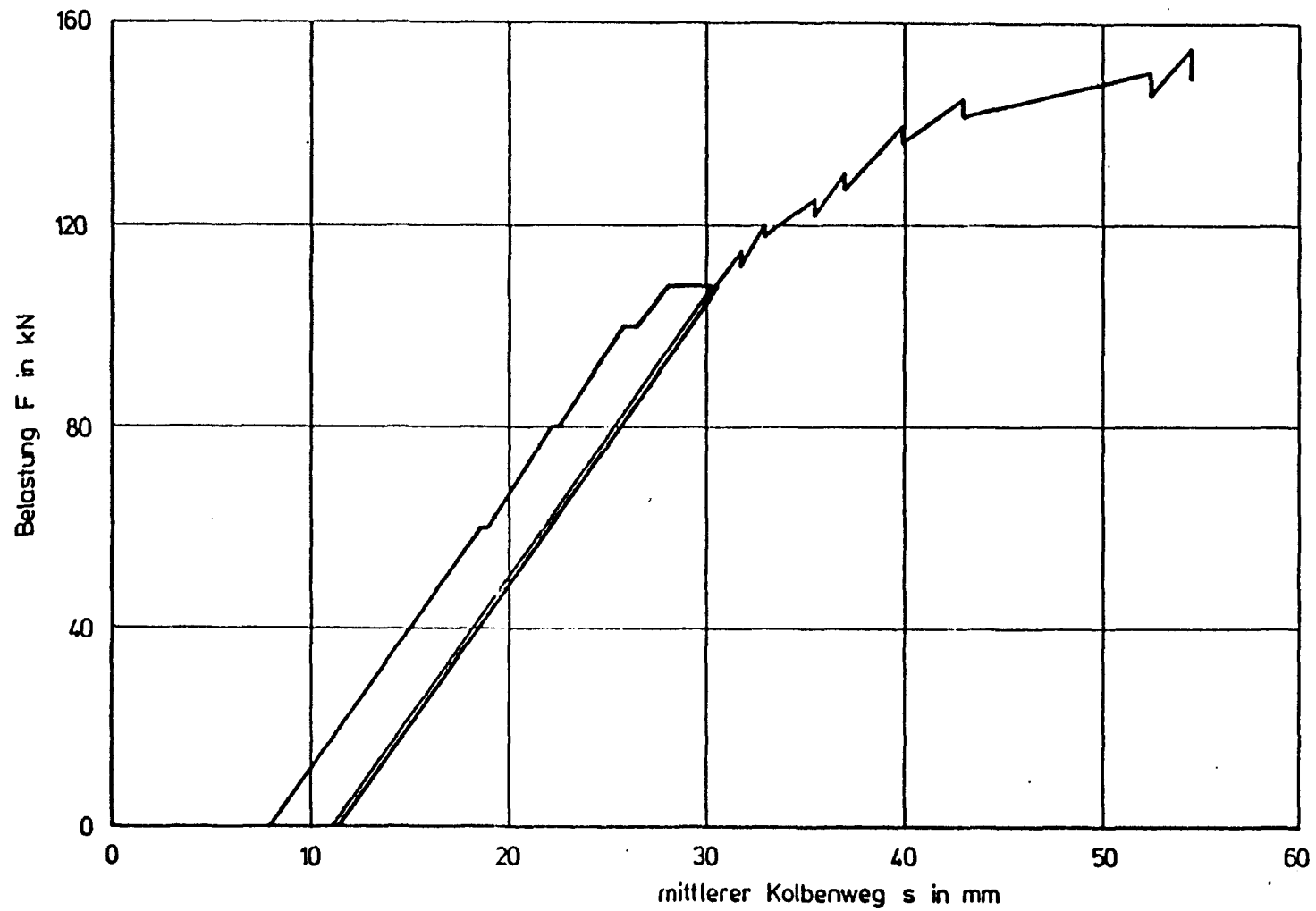
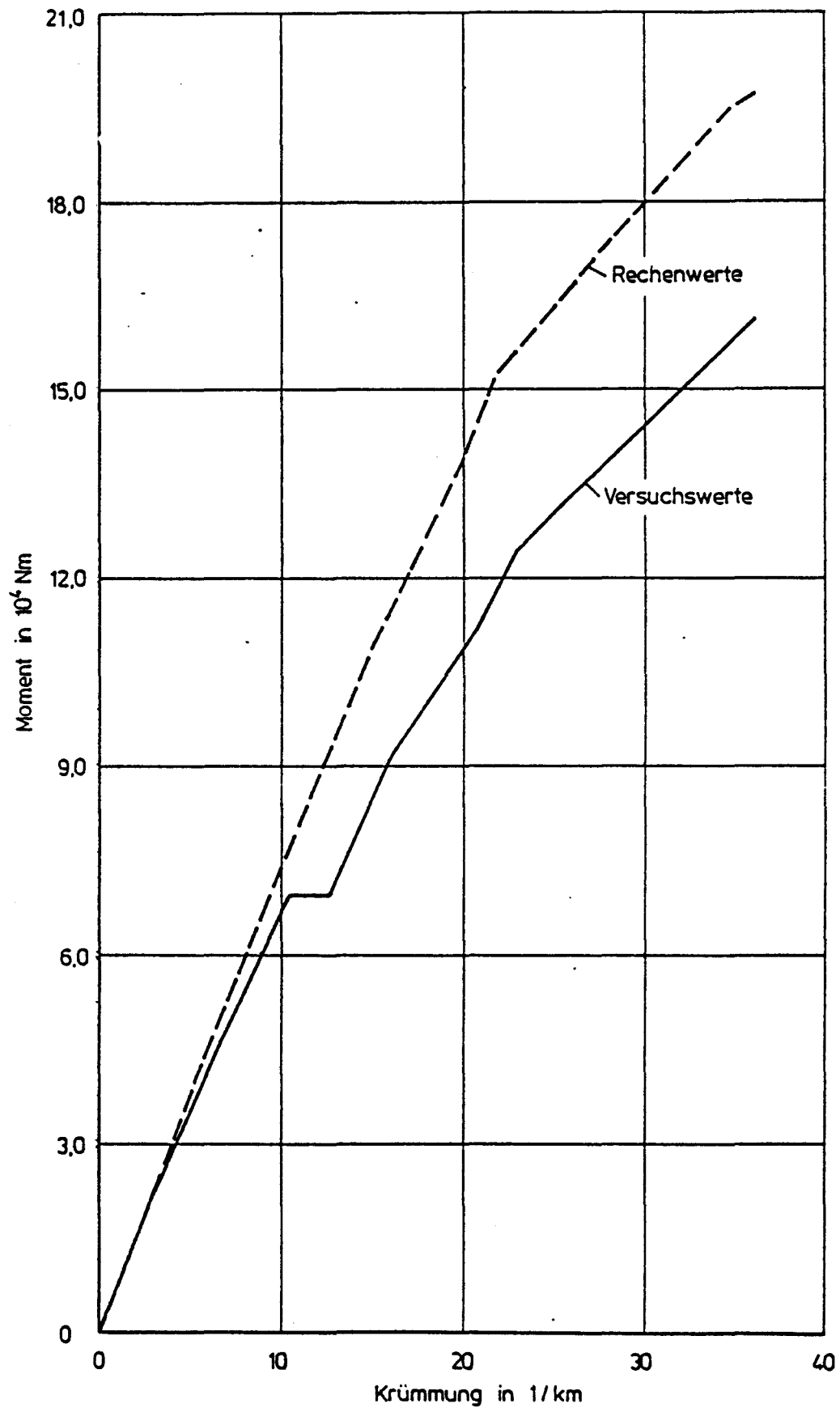


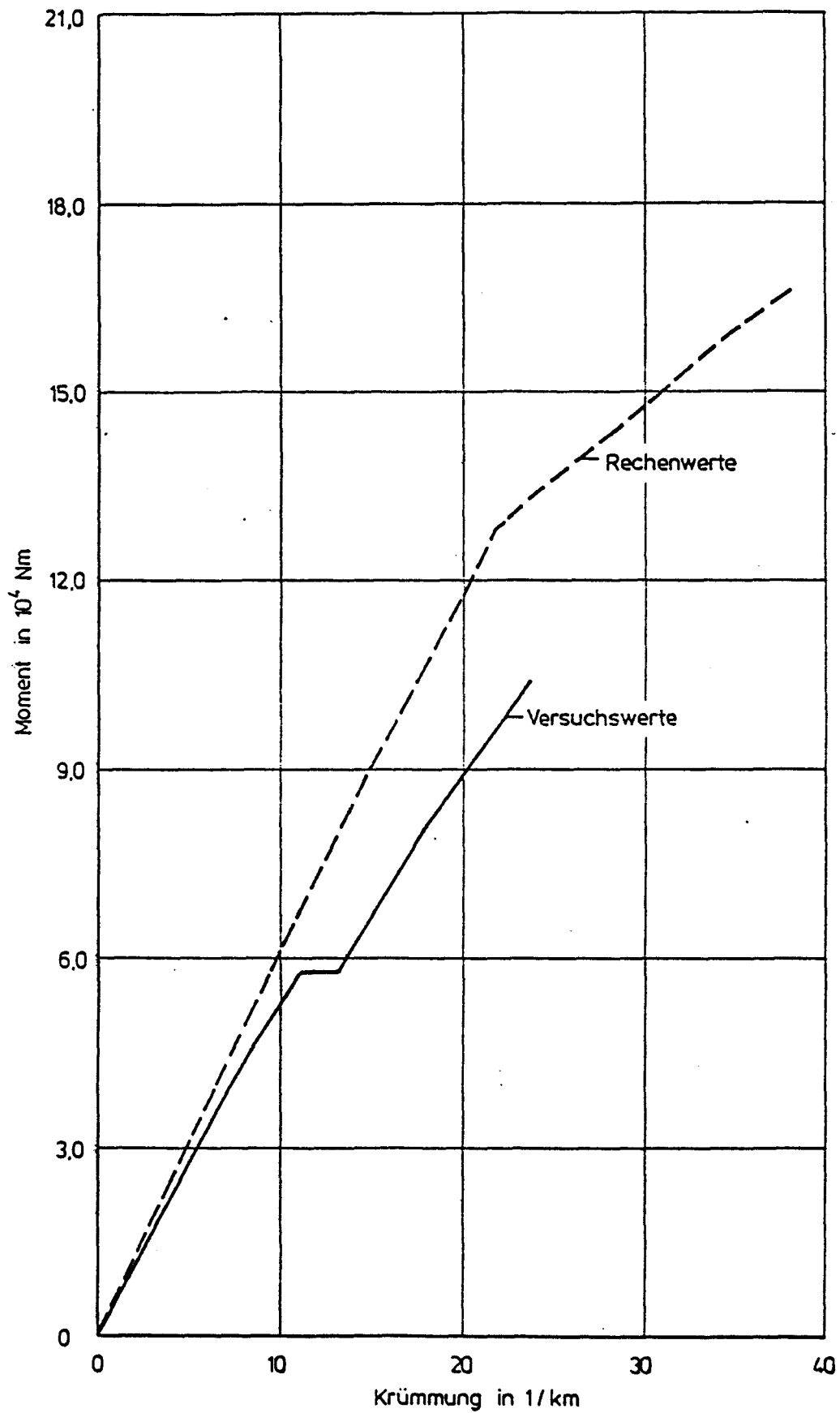
Bild 8.3.6: Kolbenweg in Abhängigkeit von der Last bei  
Platte 10 S

### Platte 3



**Bild 8.4.1:** Rechnerische und gemessene Momenten-Krümmungs-  
linien von Platte 3

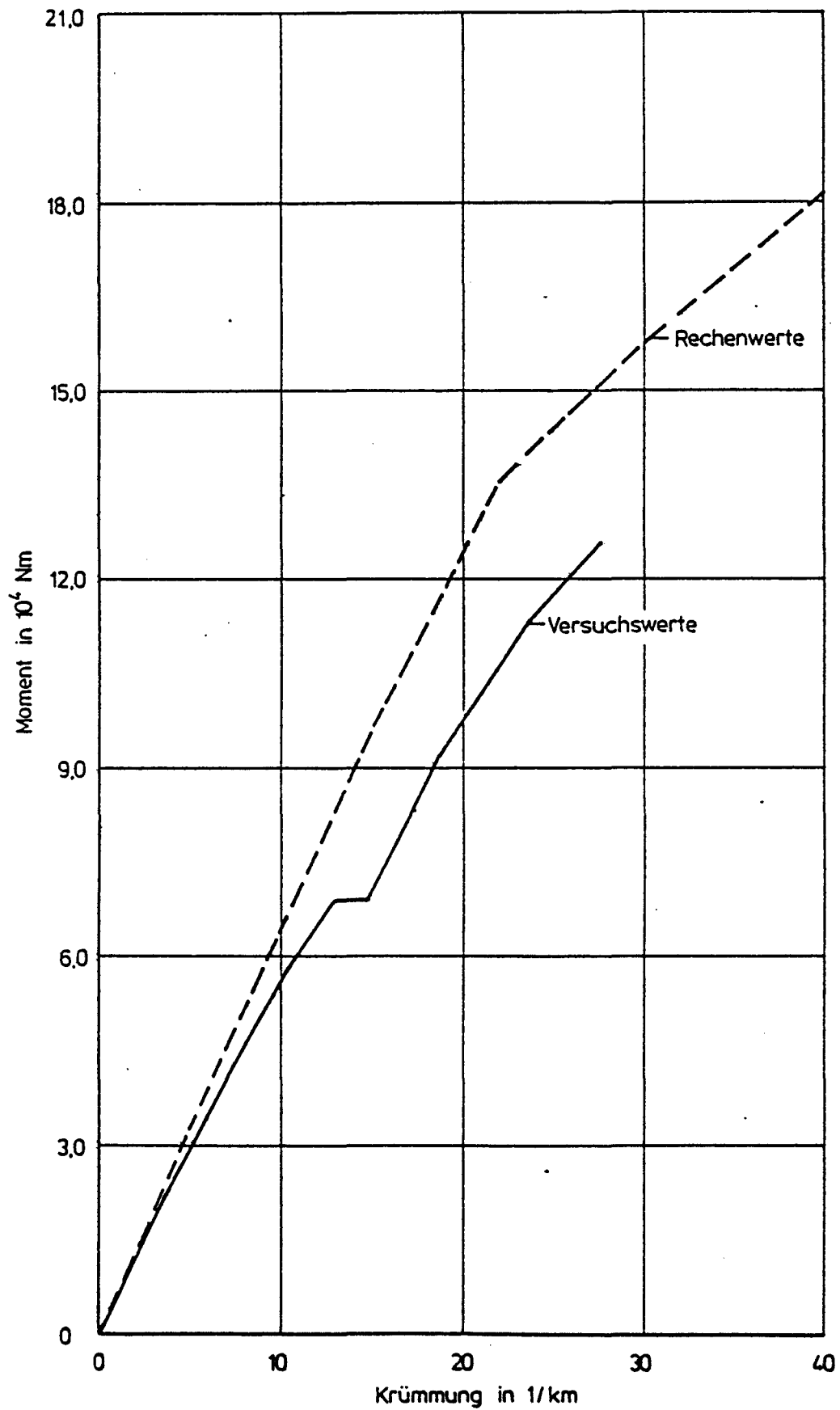
## Platte 4



**Bild 8.4.2: Rechnerische und gemessene Momenten-Krümmungs-  
linien von Platte 4**



## Platte 5



**Bild 8.4.3: Rechnerische und gemessene Momenten-Krümmungs-  
linien von Platte 5**

## Platte 6

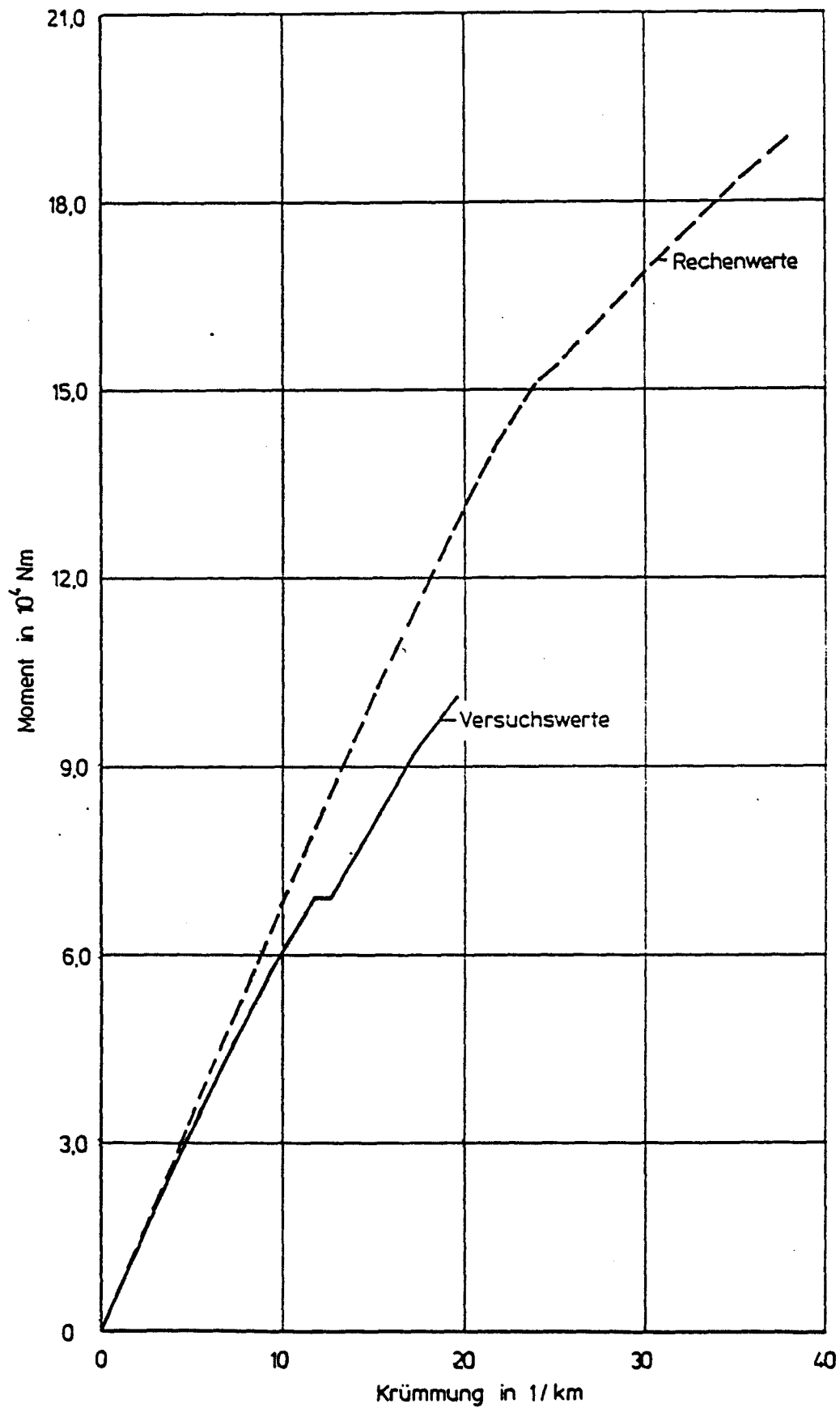


Bild 8.4.4: Rechnerische und gemessene Momenten-Krümmungs-  
linien von Platte 6

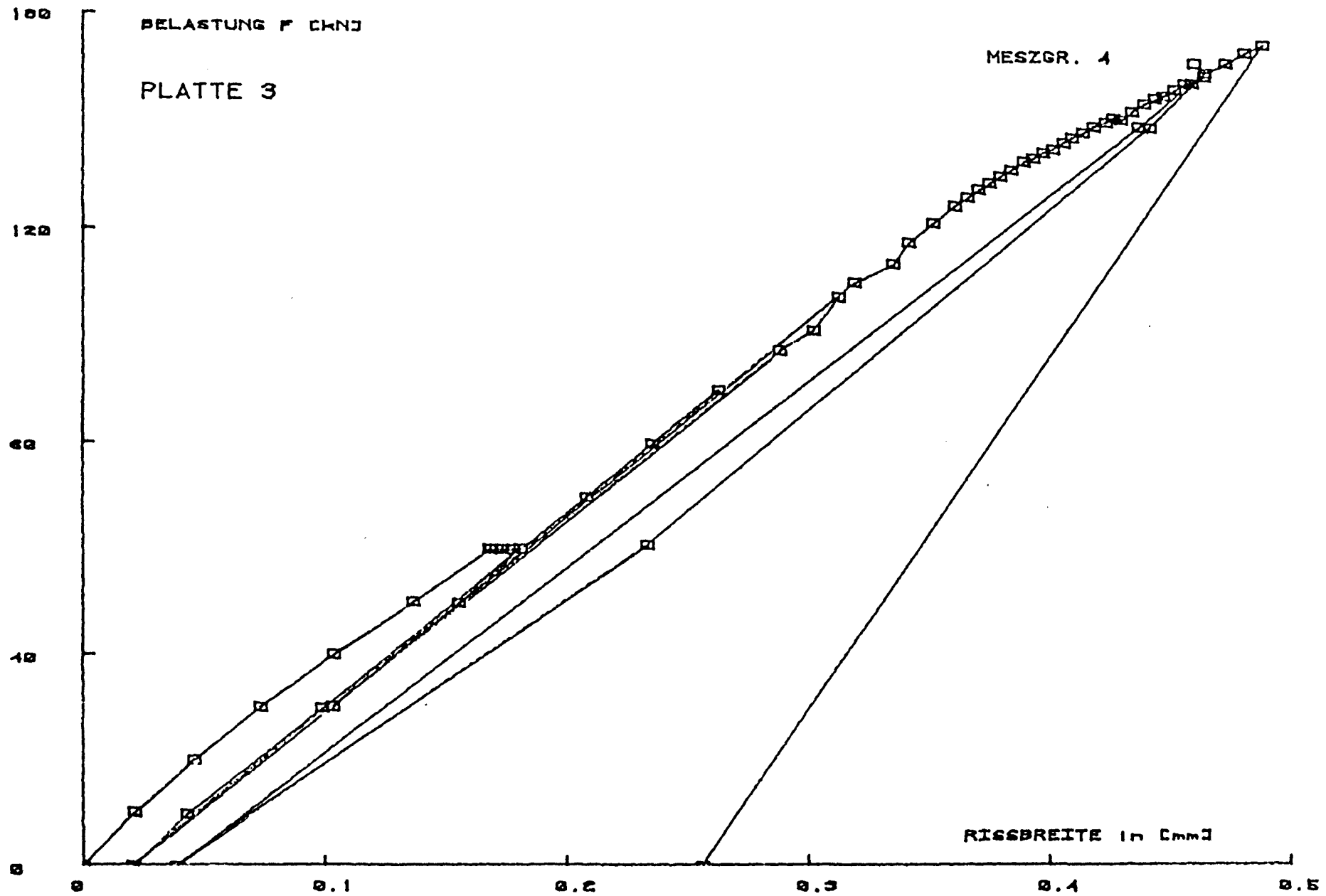


Bild 8.5.1: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 3

BELASTUNG  $F$  [kN]

MESZGR. 4

□

PLATTE NR. 4

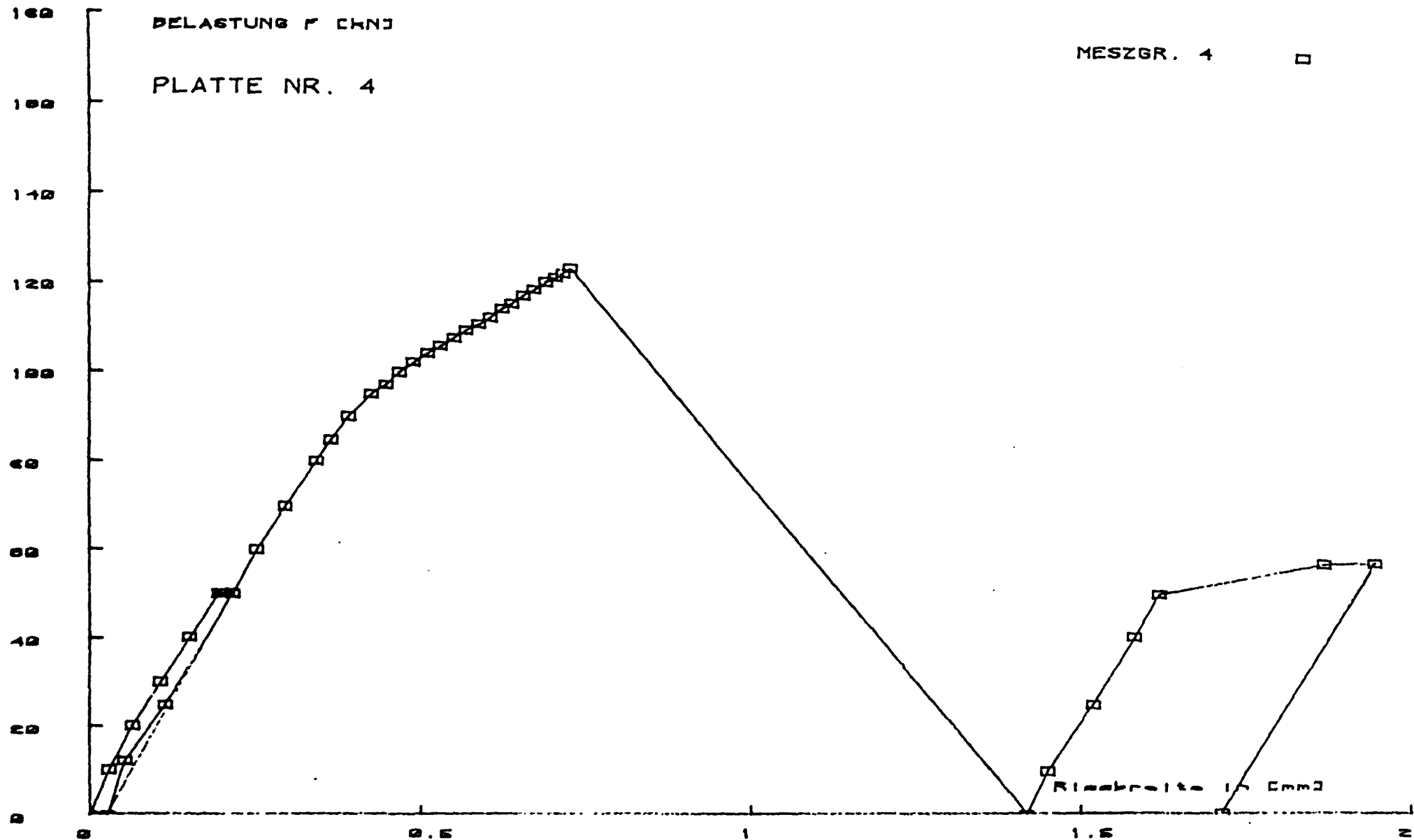


Bild 8.5.2: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 4

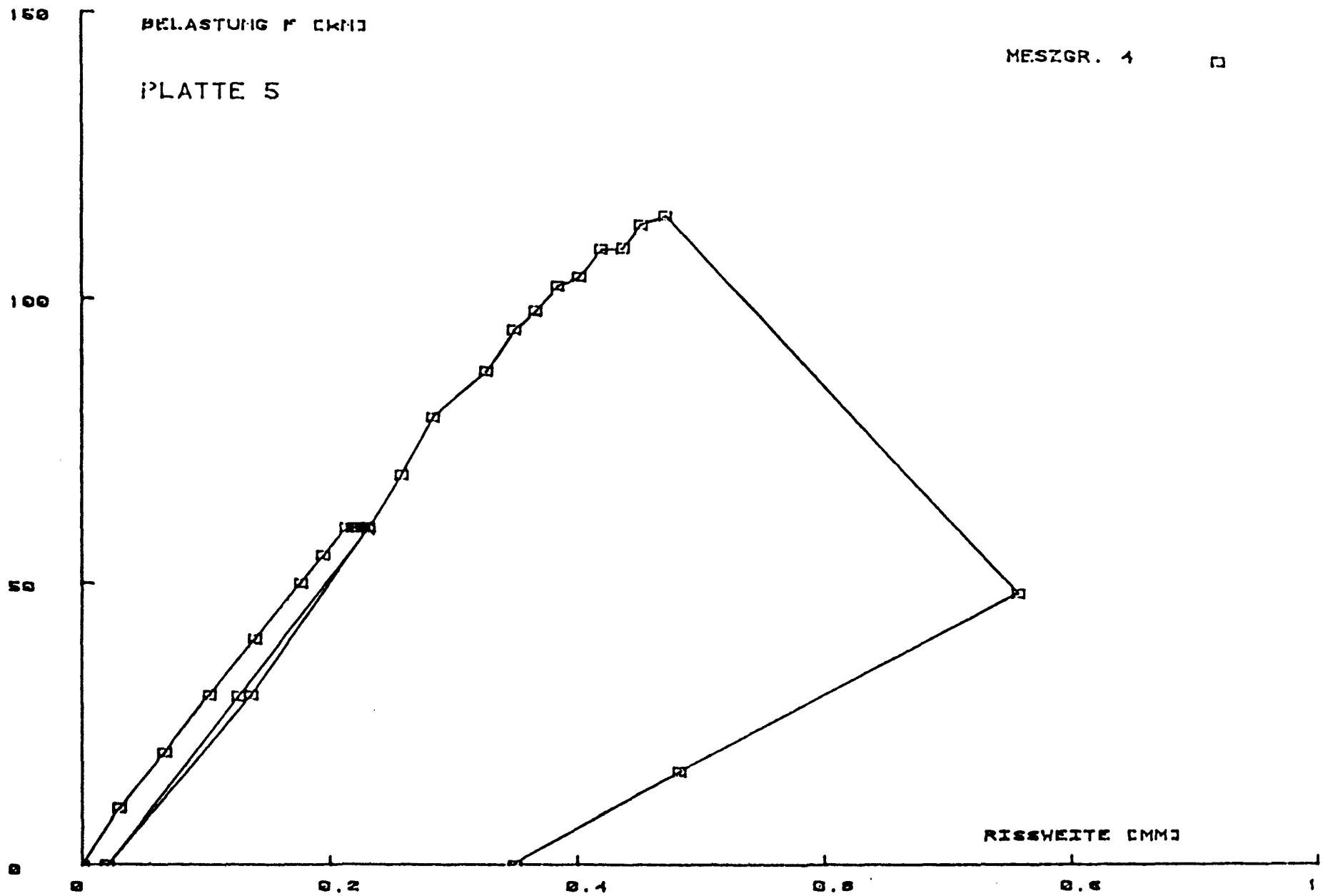


Bild 8.5.3: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 5

## PLATTE 6

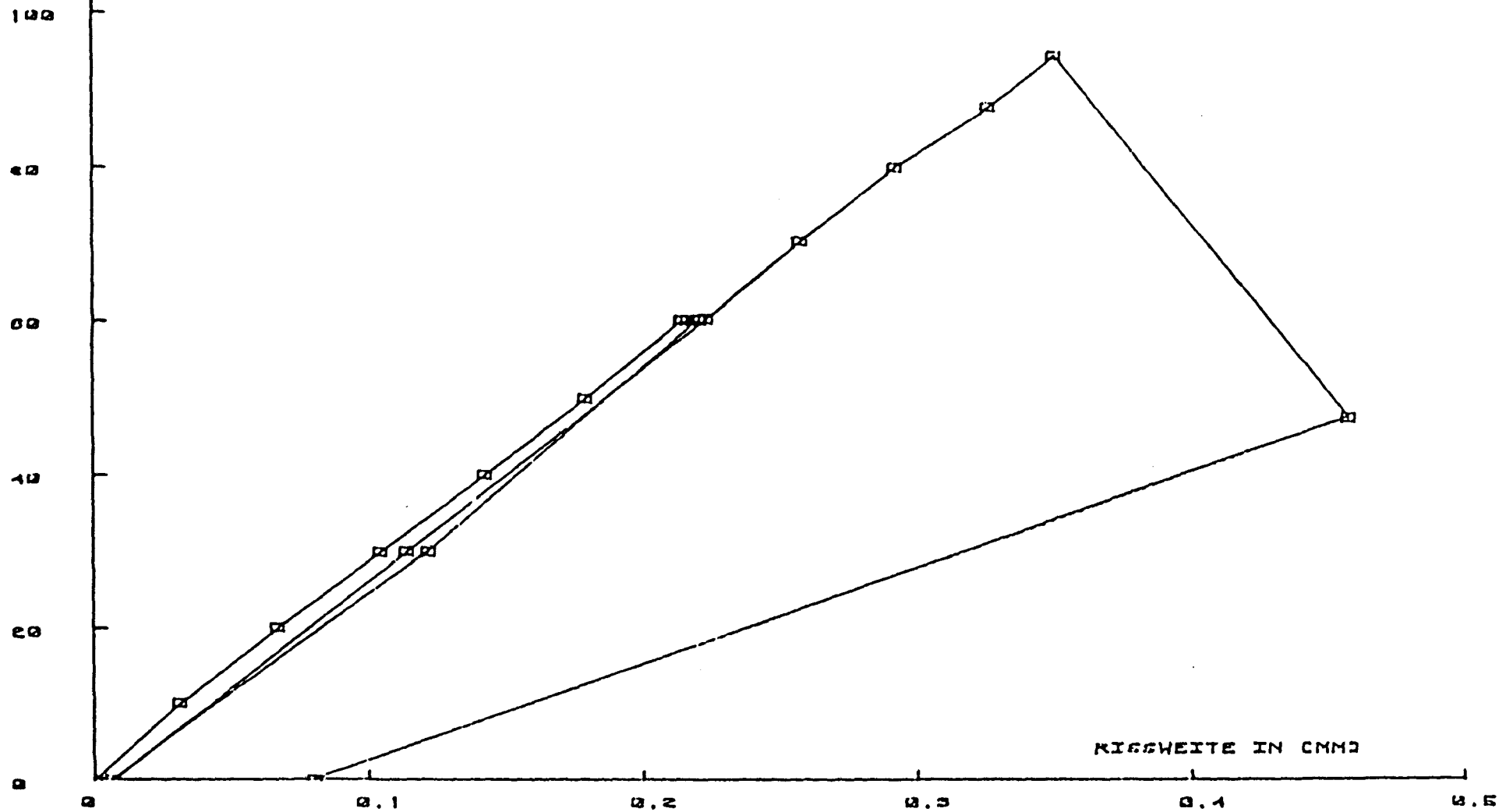


Bild 8.5.4: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 6

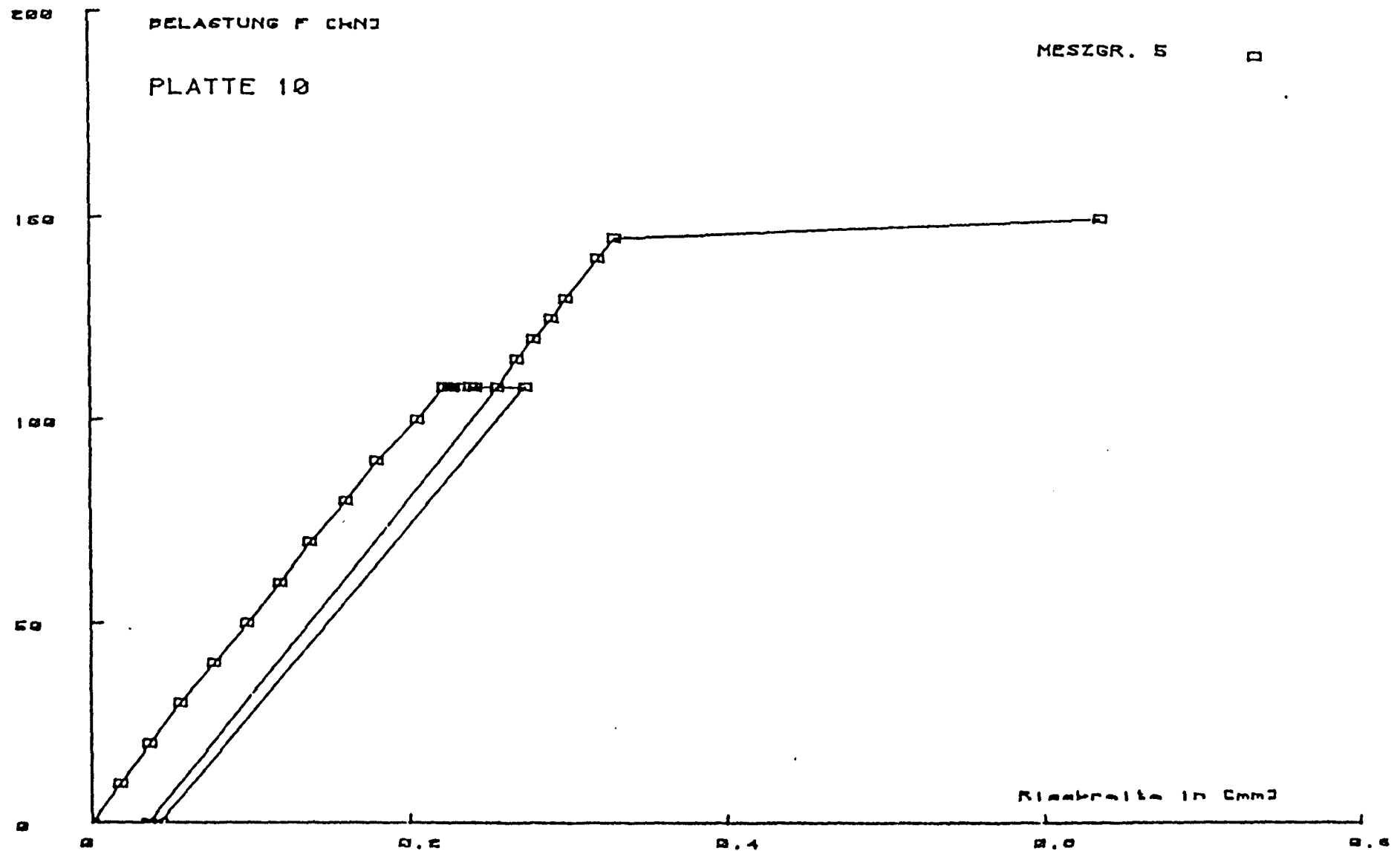


Bild 8.5.5: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 10

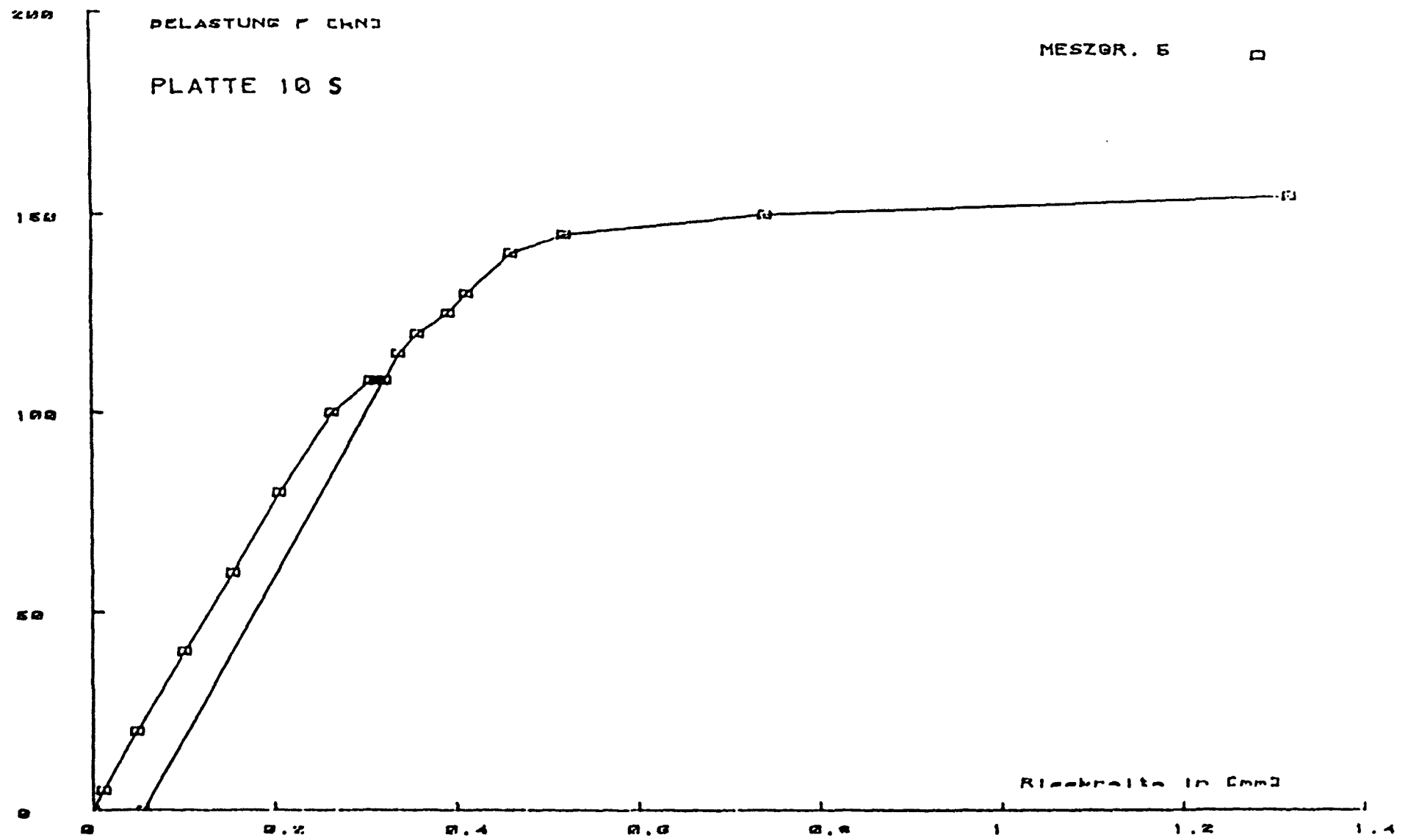


Bild 8.5.6: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 10 S



# Platte 3

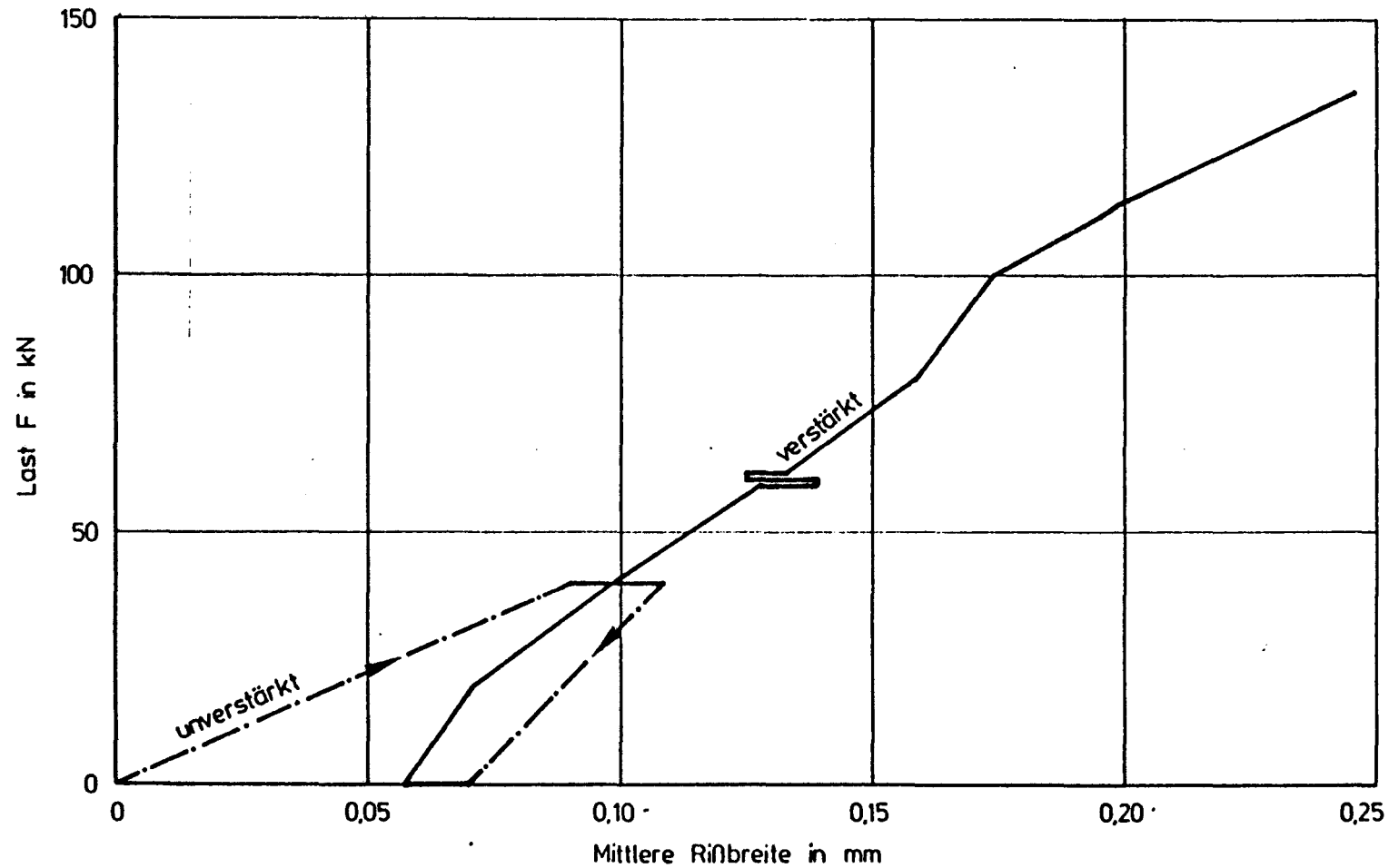


Bild 8.6.1: Mittlere Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 3

## Platte 4

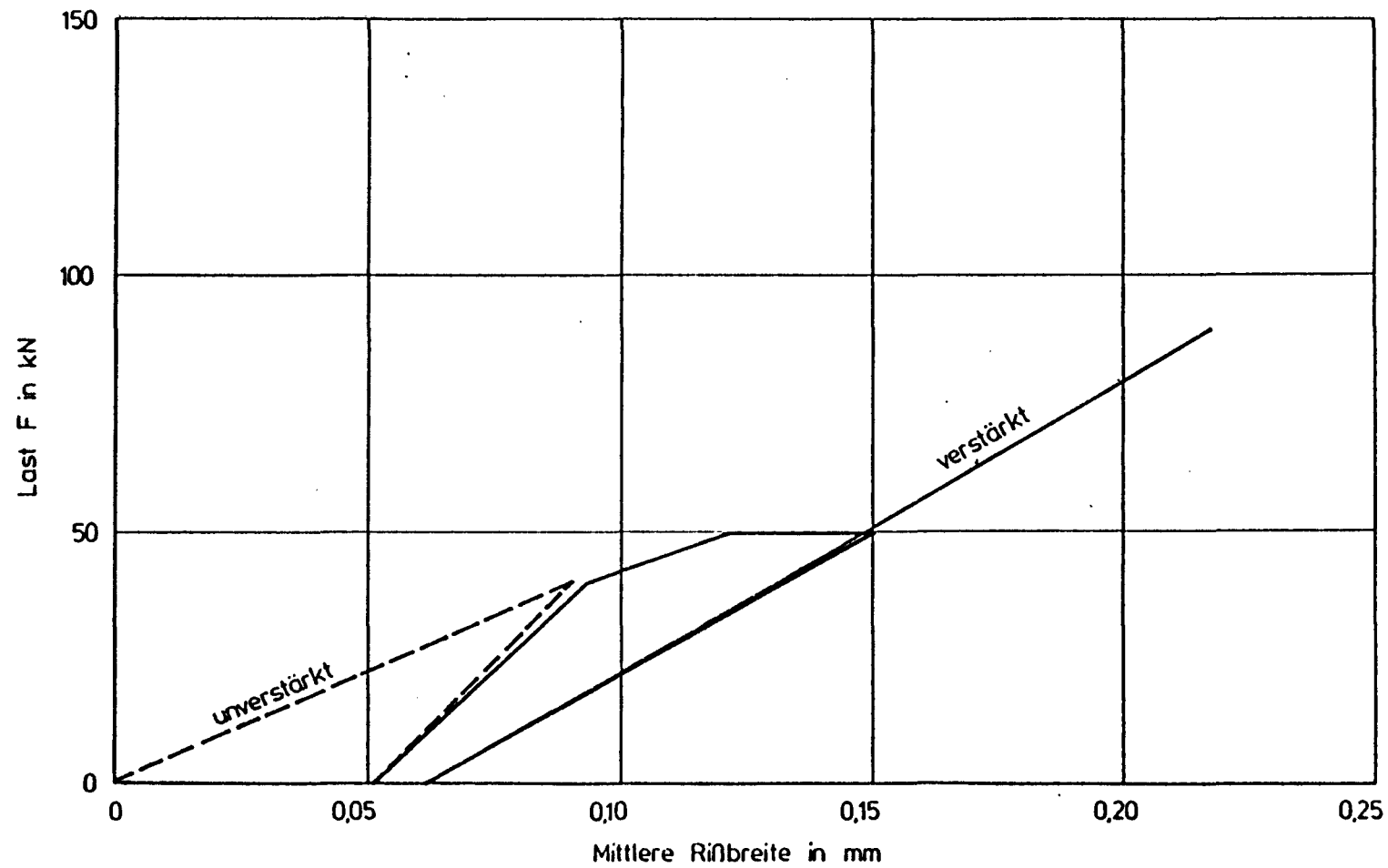


Bild 8.6.2: Mittlere Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 4

## Platte 5

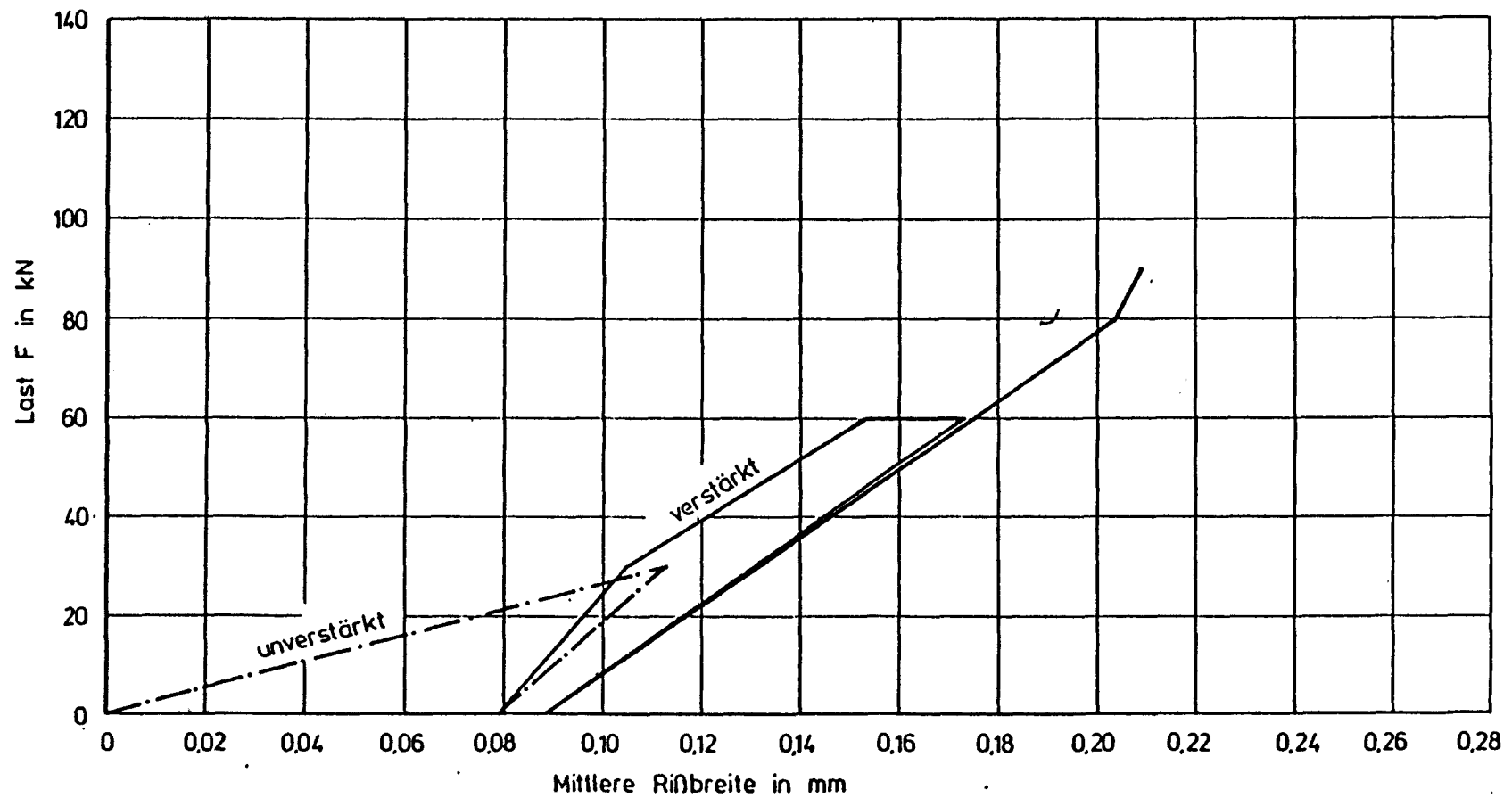


Bild 8.6.3: Mittlere Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 5

## Platte 6

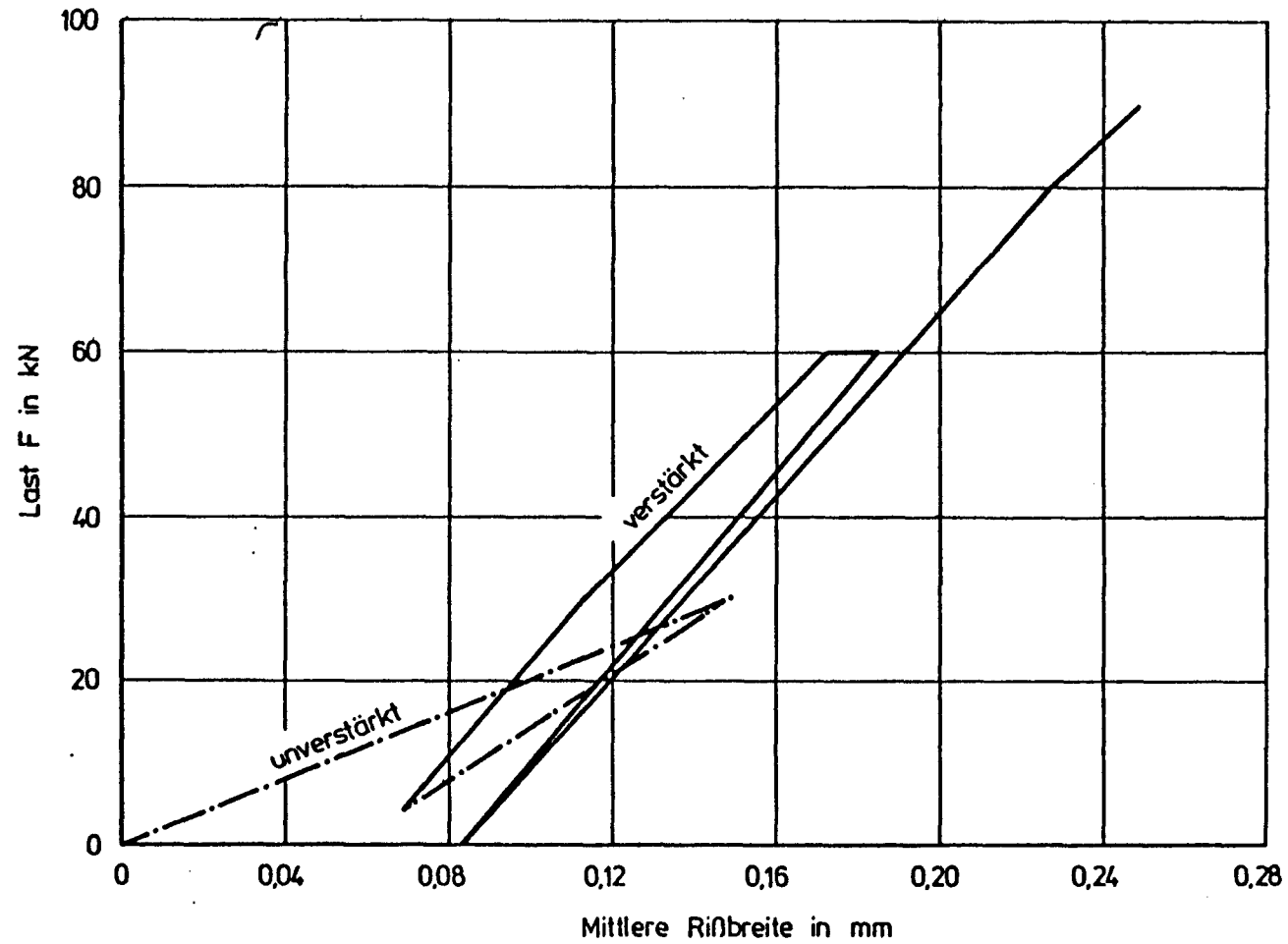


Bild 8.6.4: Mittlere Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 6

## Platte 10

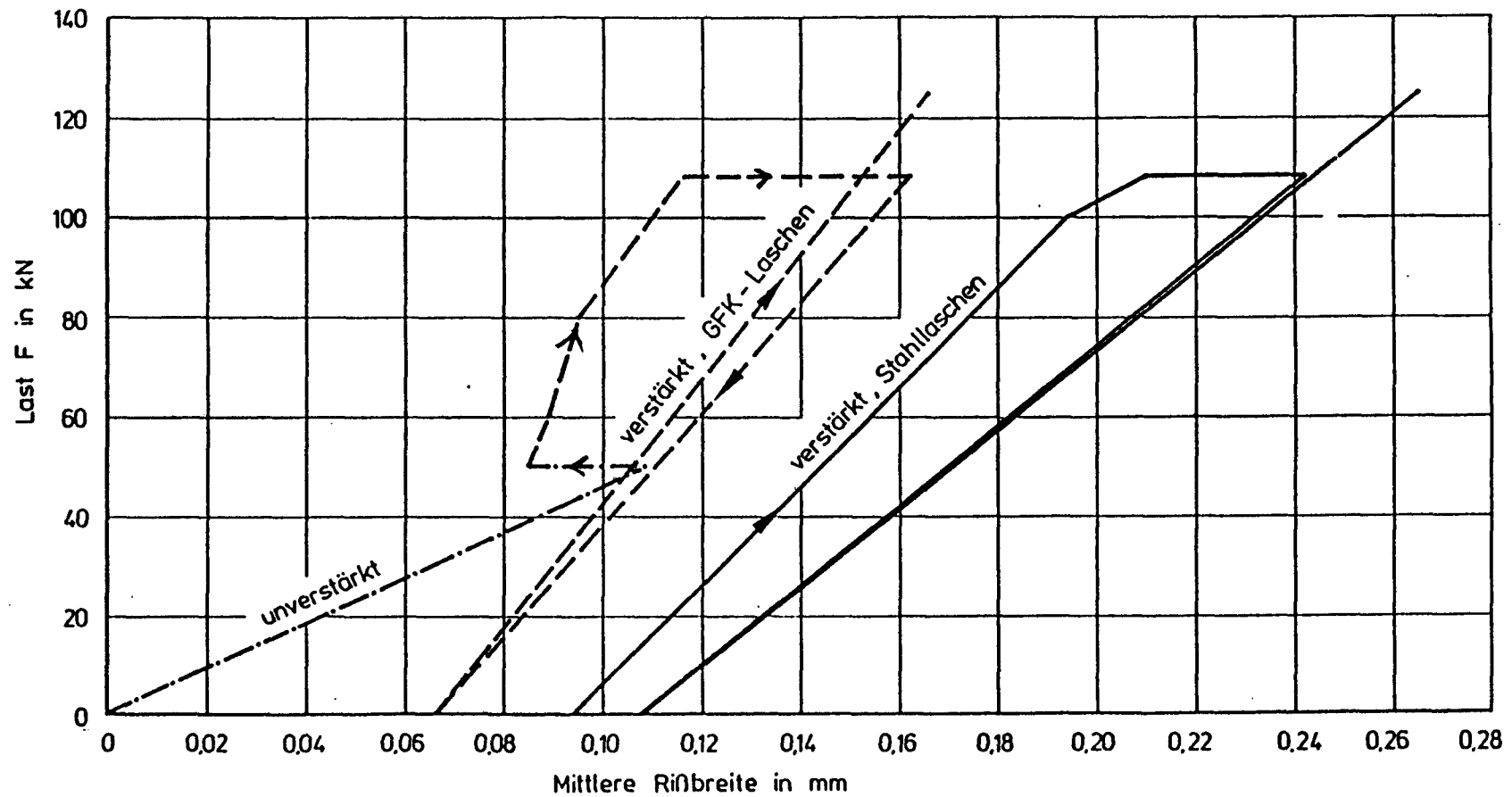


Bild 8.6.5: Mittlere Rißbreite in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 10 und 10 S

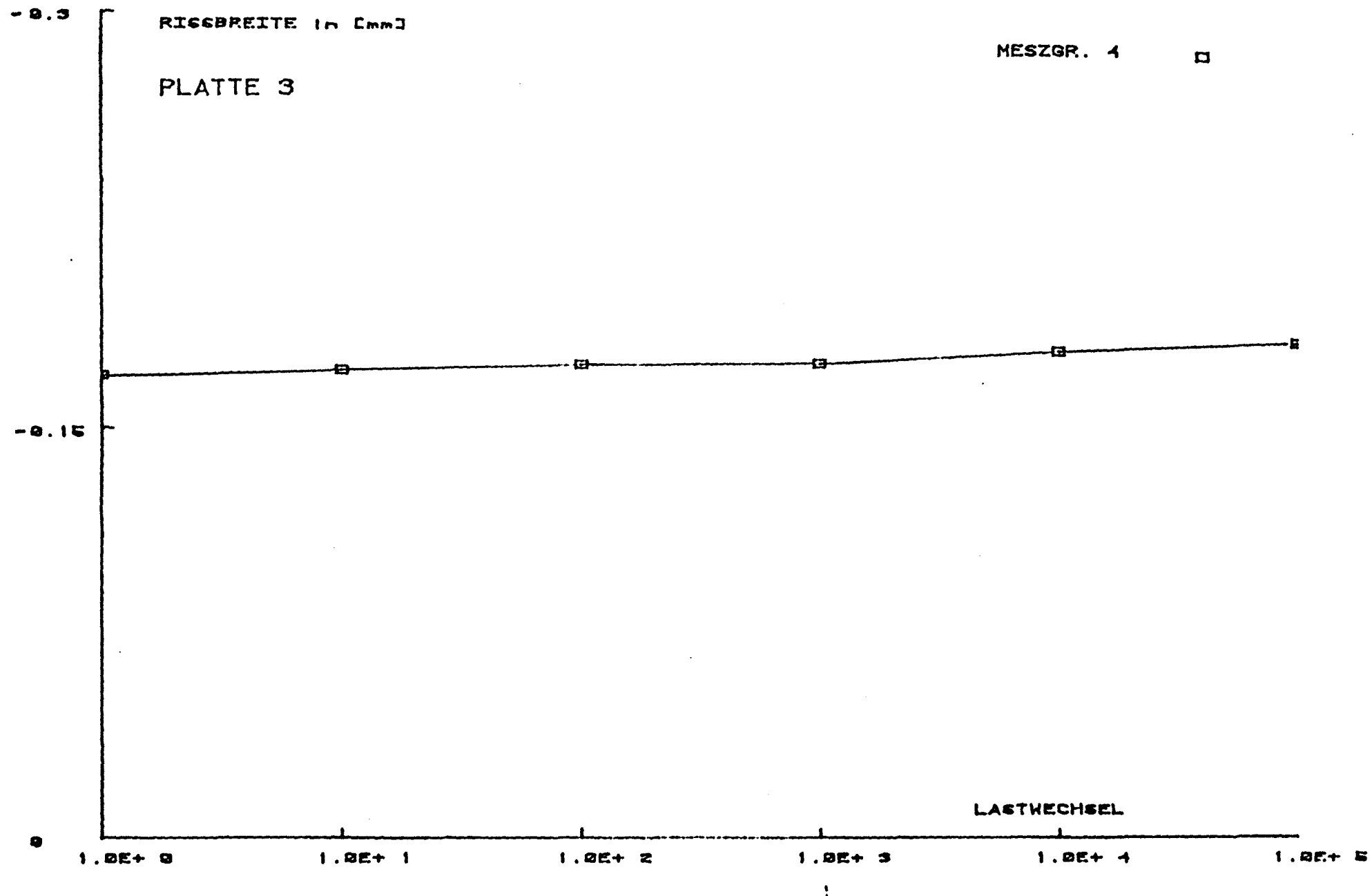


Bild 8.7.1: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 3

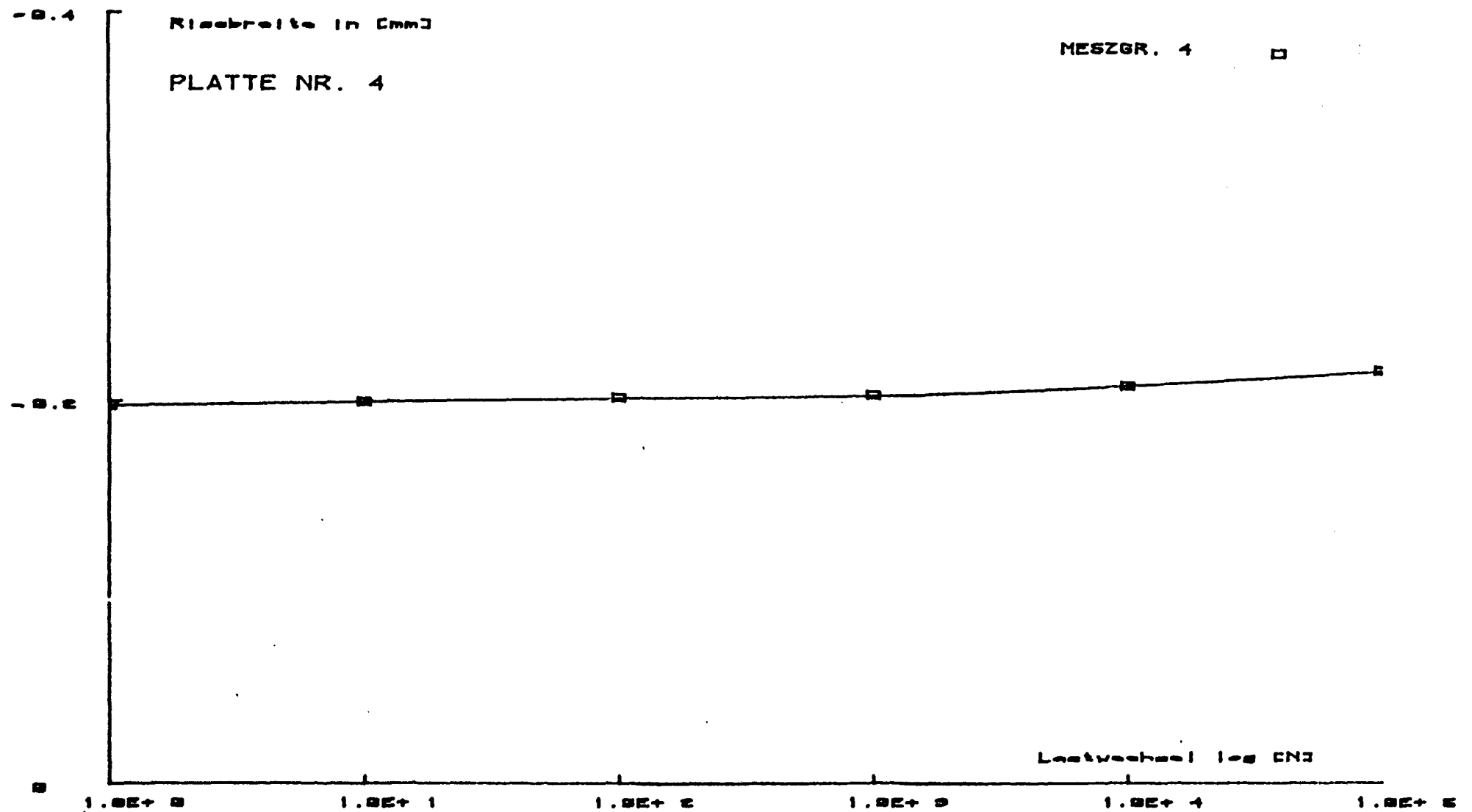


Bild 8.7.2: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 4

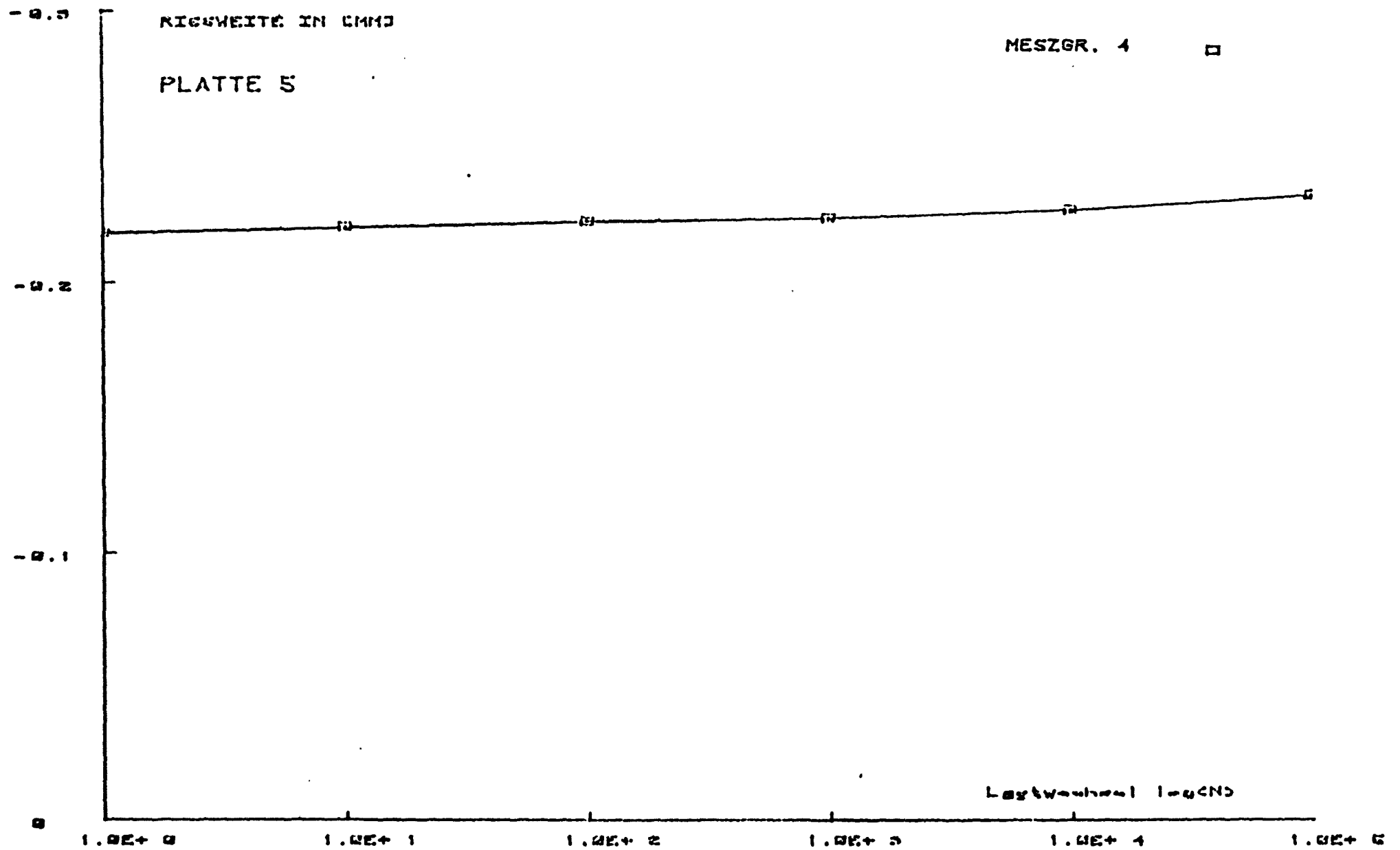


Bild 8.7.3: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 5



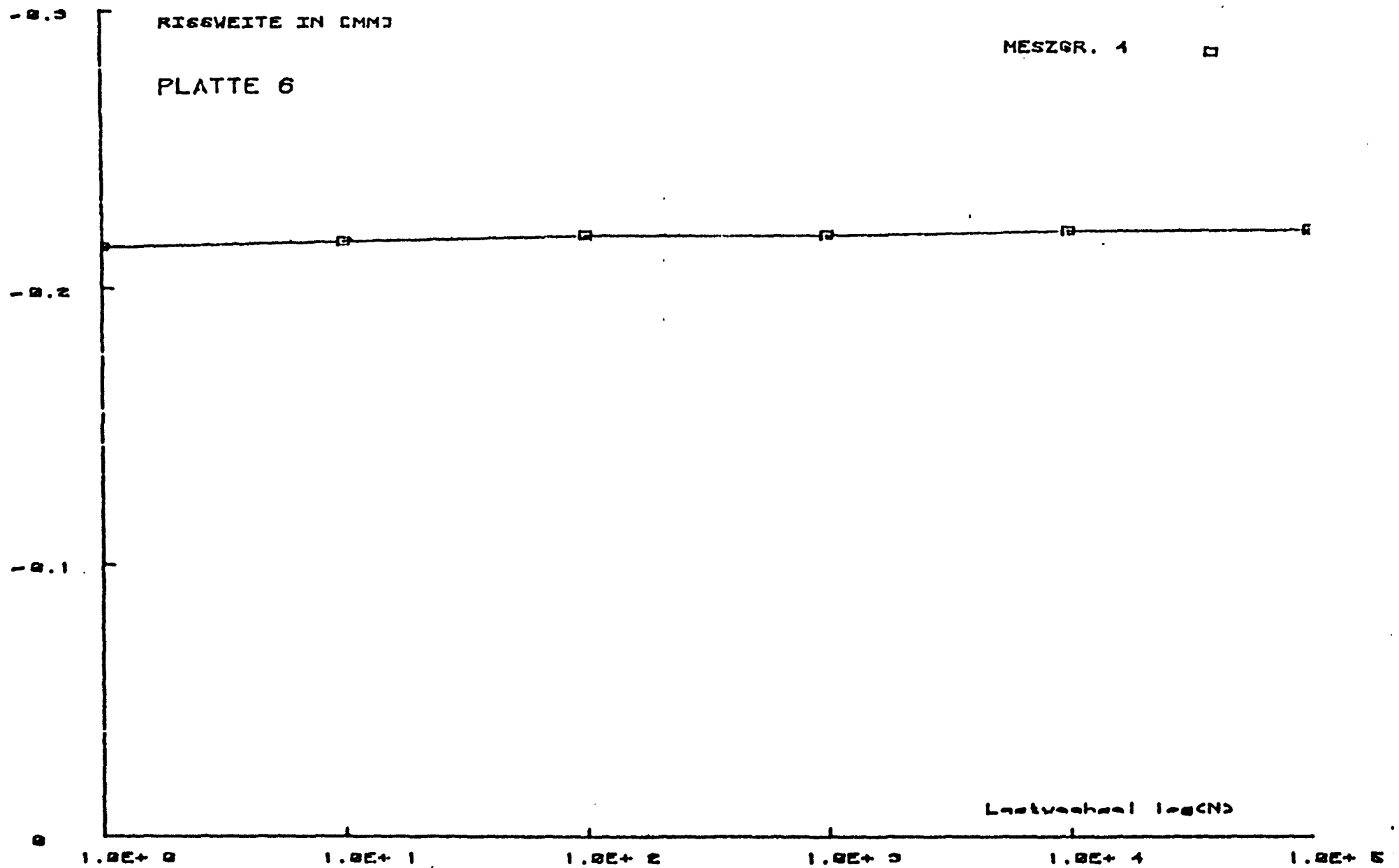


Bild 8.7.4: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 6

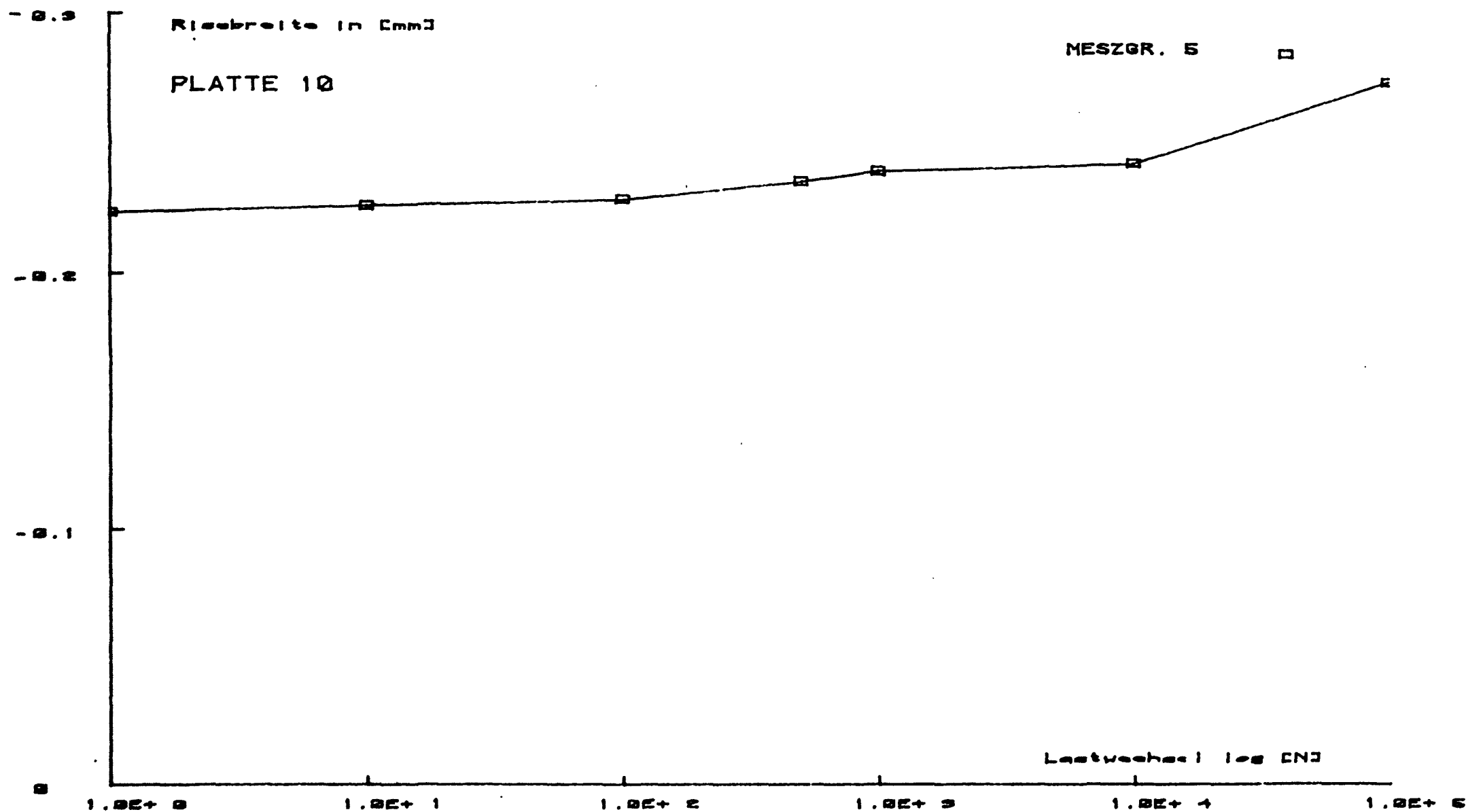


Bild 8.7.5: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 10

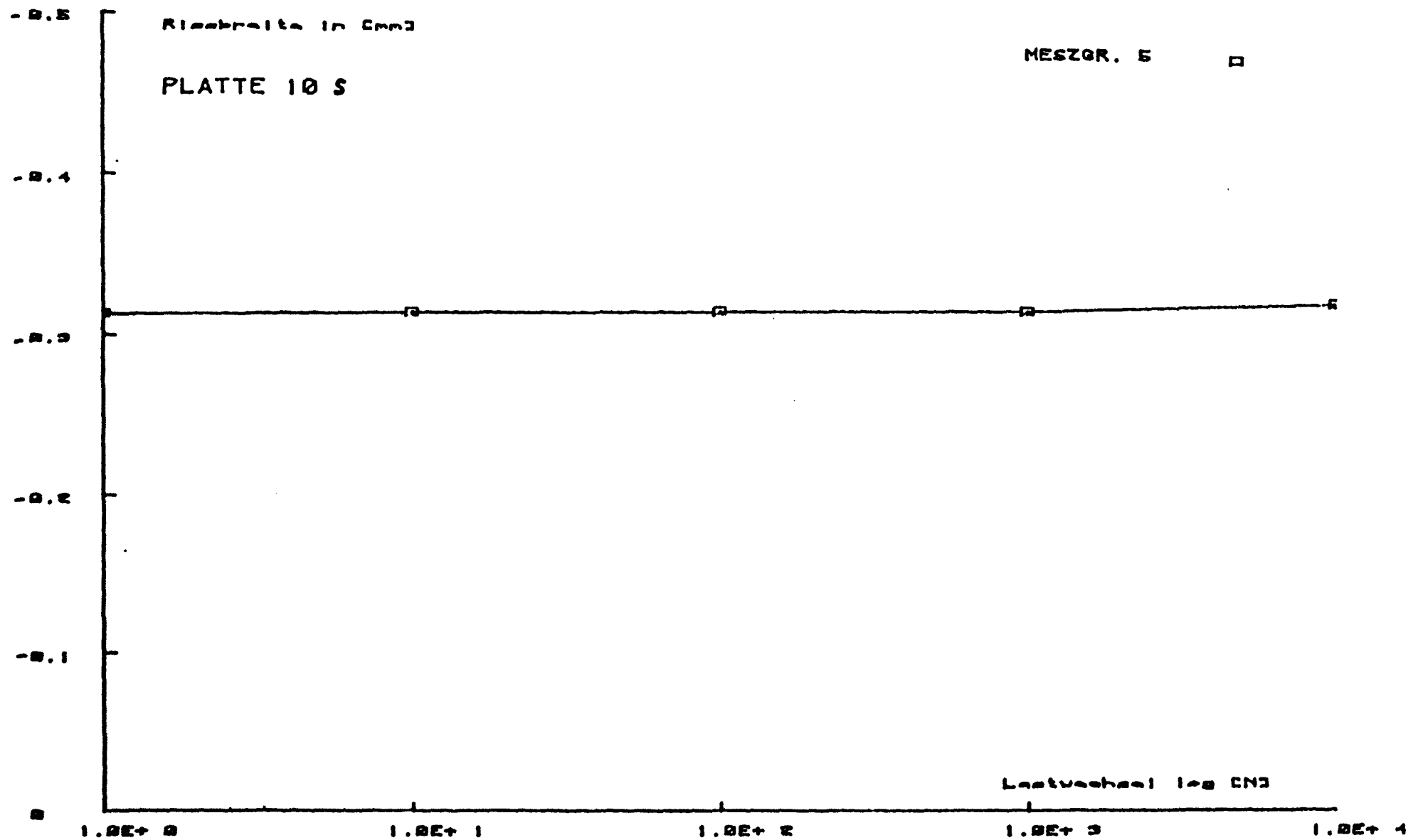


Bild 8.7.6: Maximale Rißbreite in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte

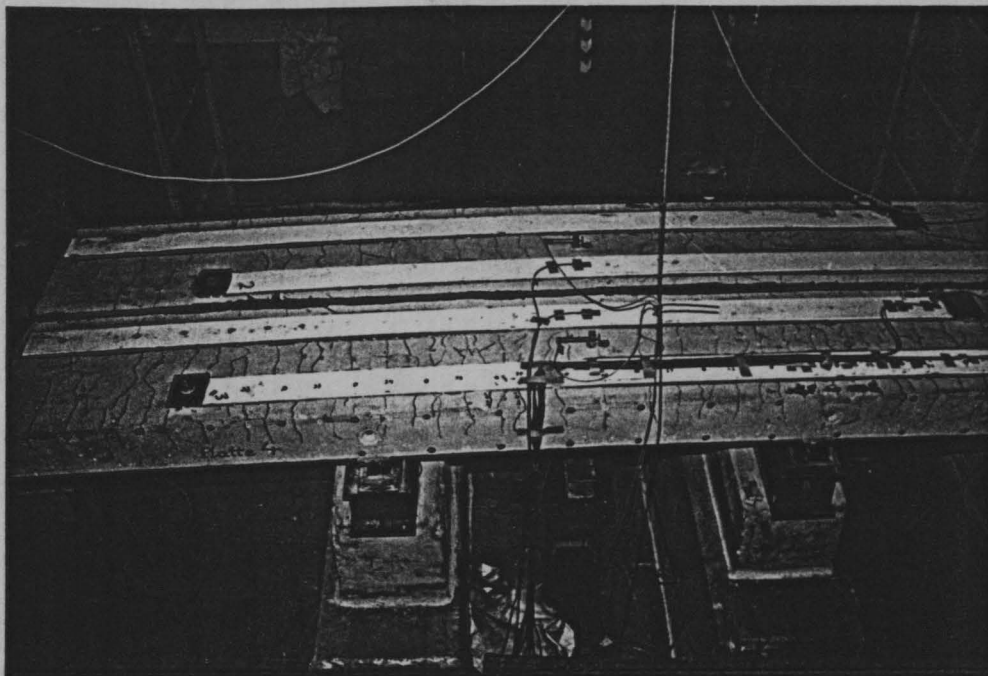


Bild 8.8.1 : Platte 4 mit nachgezeichneten Rissen  
nach dem Bruchversuch

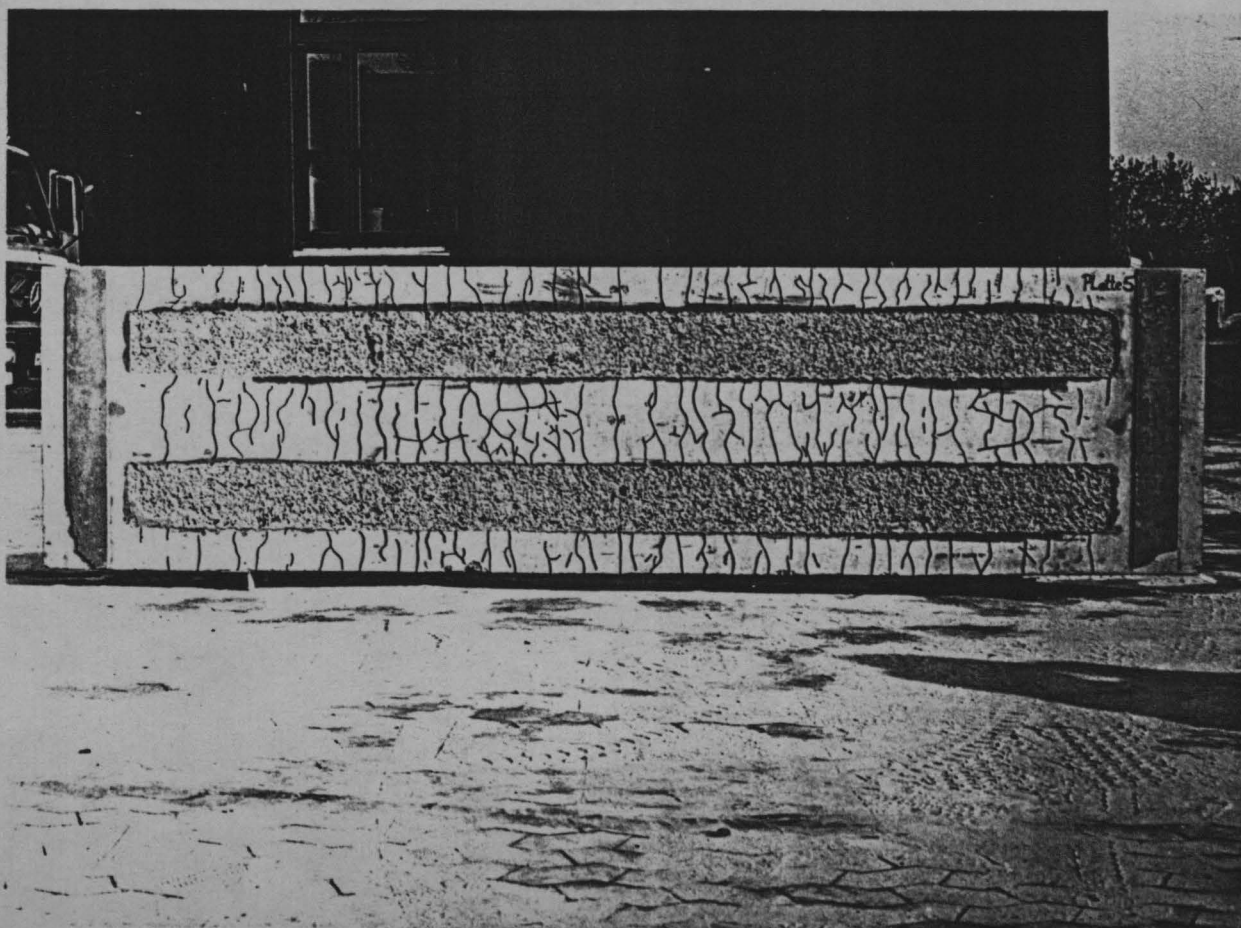


Bild 8.8.2 : Rißbild von Platte 5

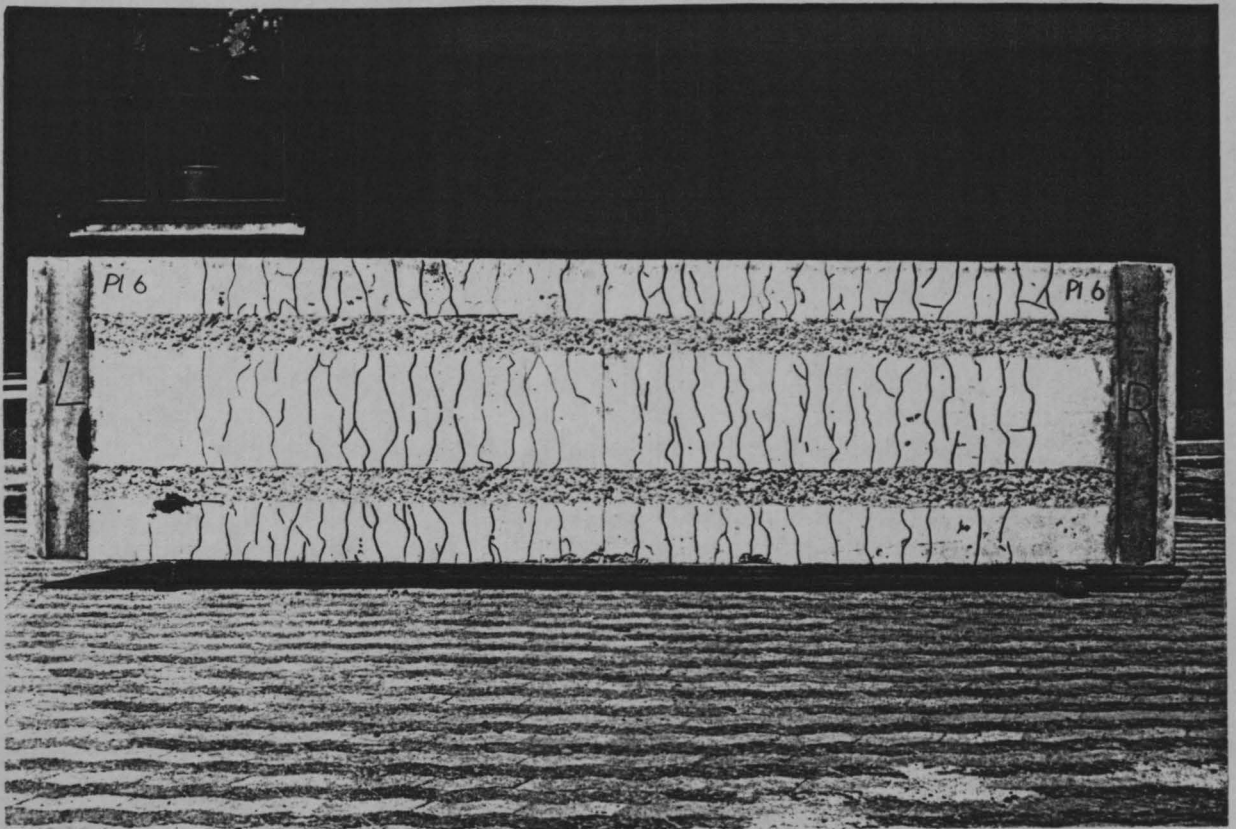


Bild 8.8.3 : Rißbild von Platte 6

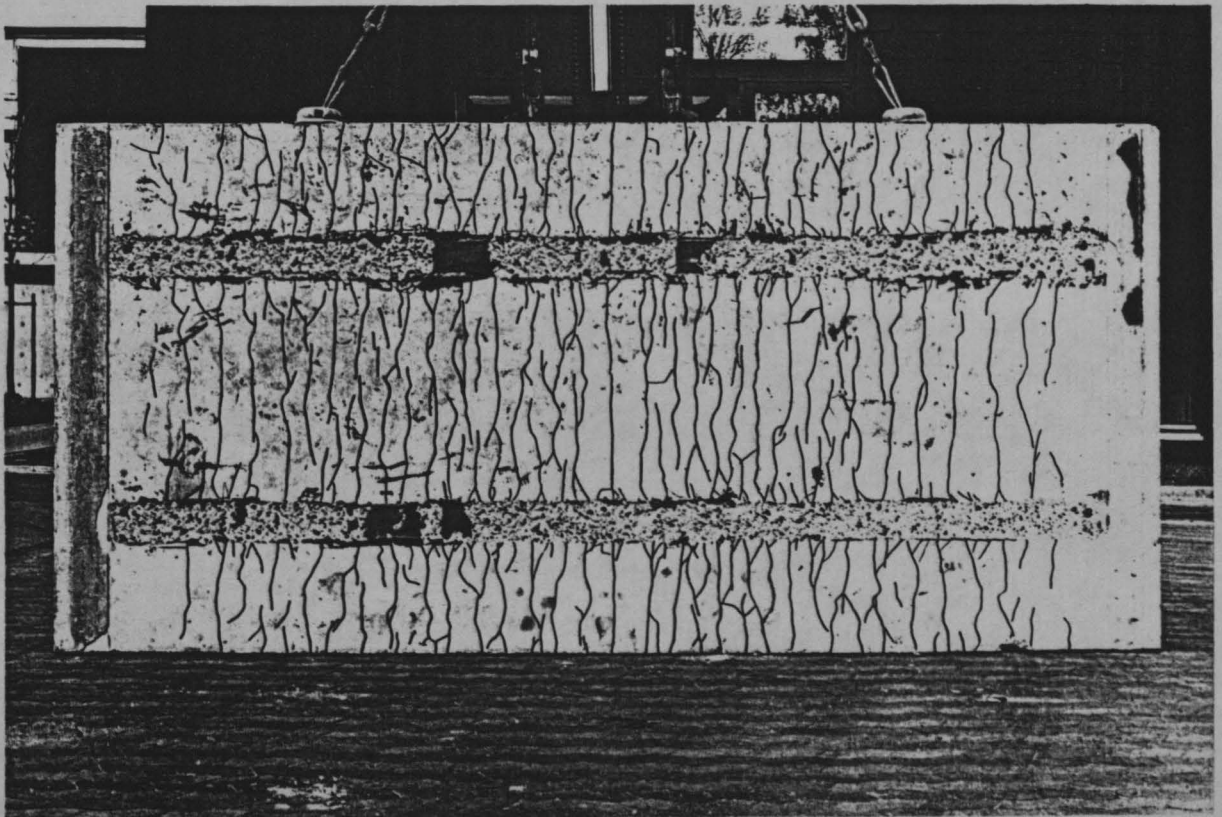


Bild 8.8.4 : Rißbild von Platte 10

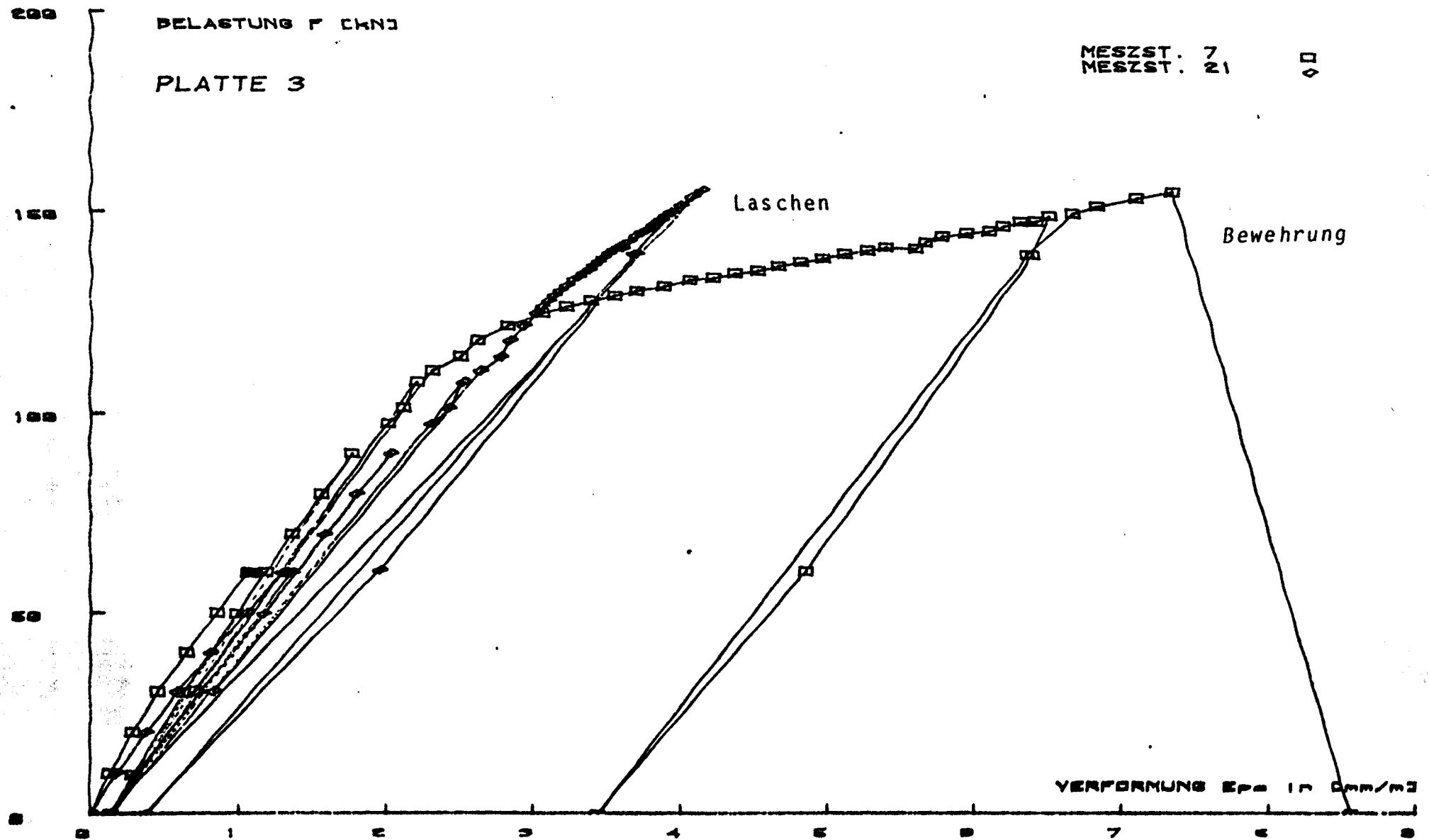


Bild 8.9.1: Maximale Dehnungen der Bewehrung und der Laschen im RiB in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 3

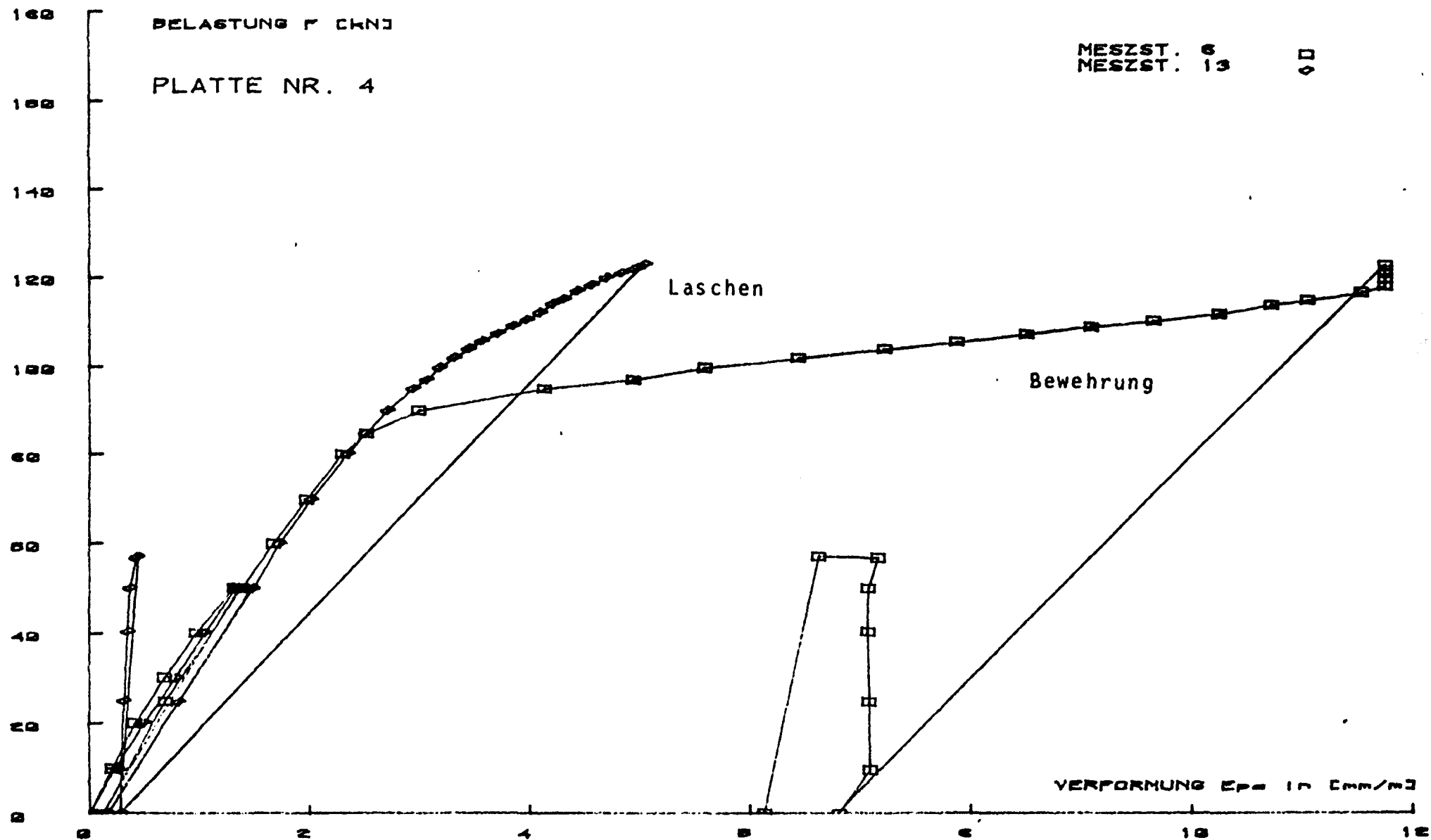


Bild 8.9.2: Maximale Dehnungen der Bewehrung und der Laschen im Riß in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 4

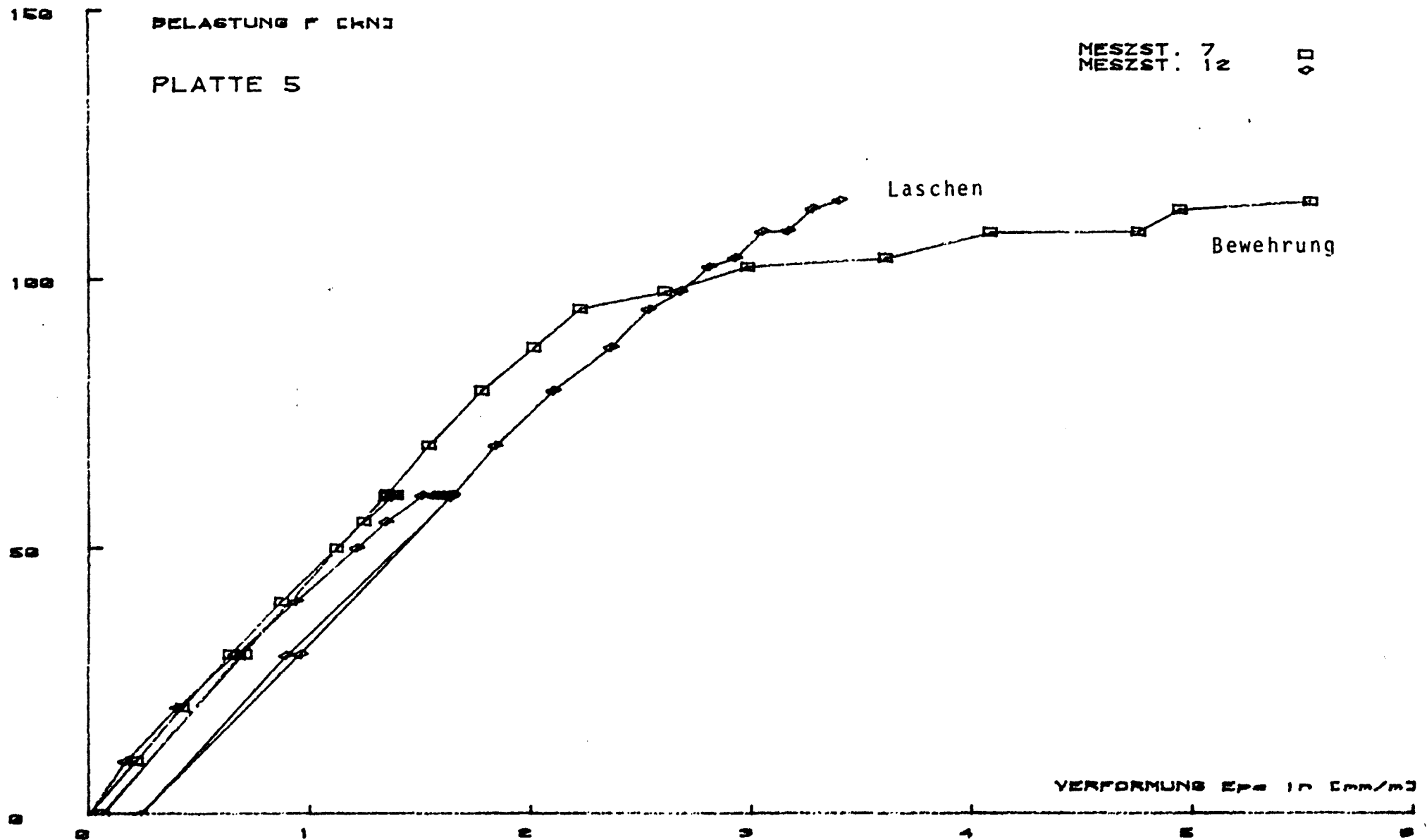


Bild 8.9.3: Maximale Dehnungen der Bewehrung und der Laschen im Riß in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 5



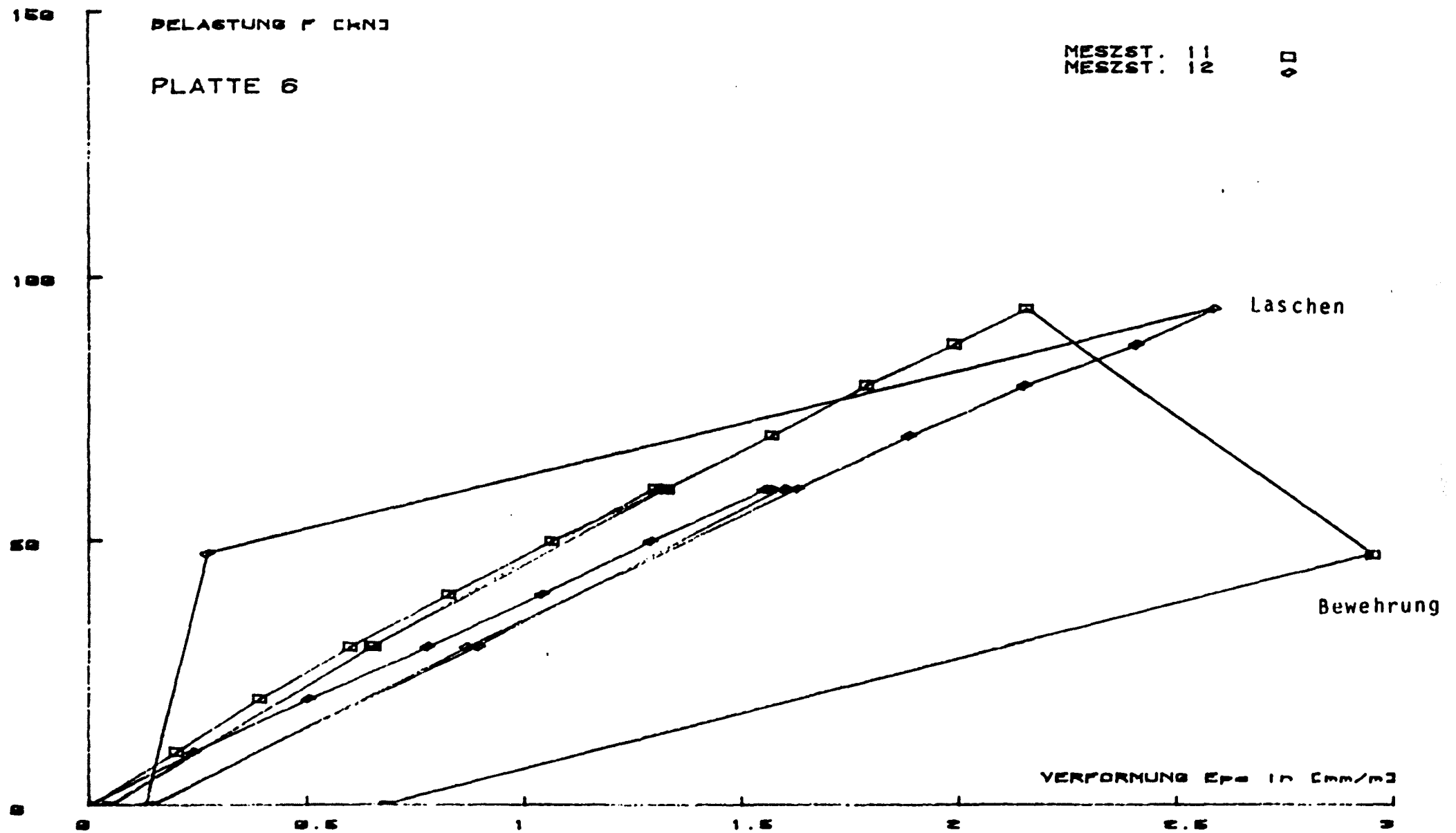


Bild 8.9.4: Maximale Dehnungen der Bewehrung und der Laschen im Riß in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 6

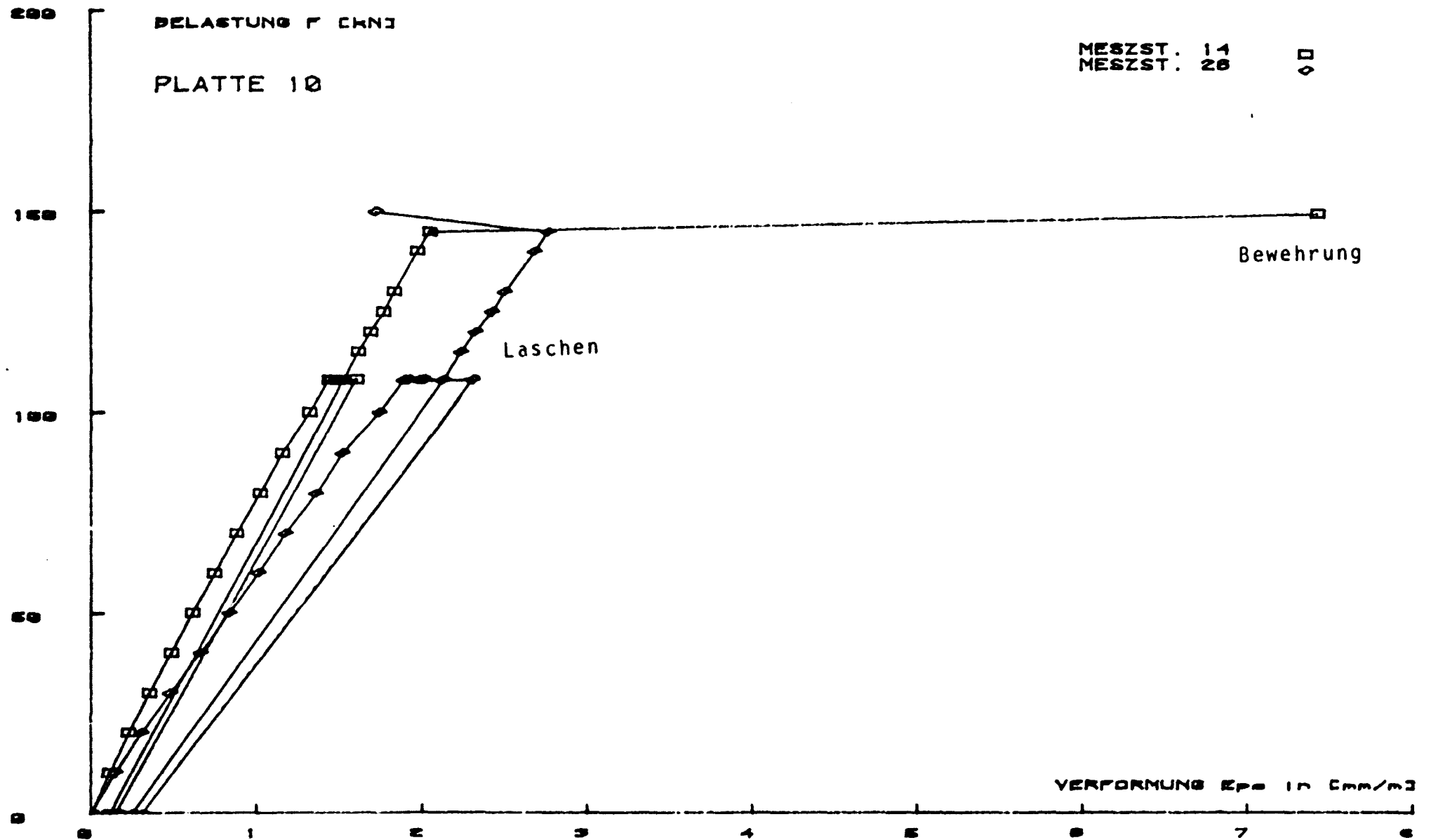


Bild 8.9.5: Maximale Dehnungen der Bewehrung und der Laschen im Riß in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 10

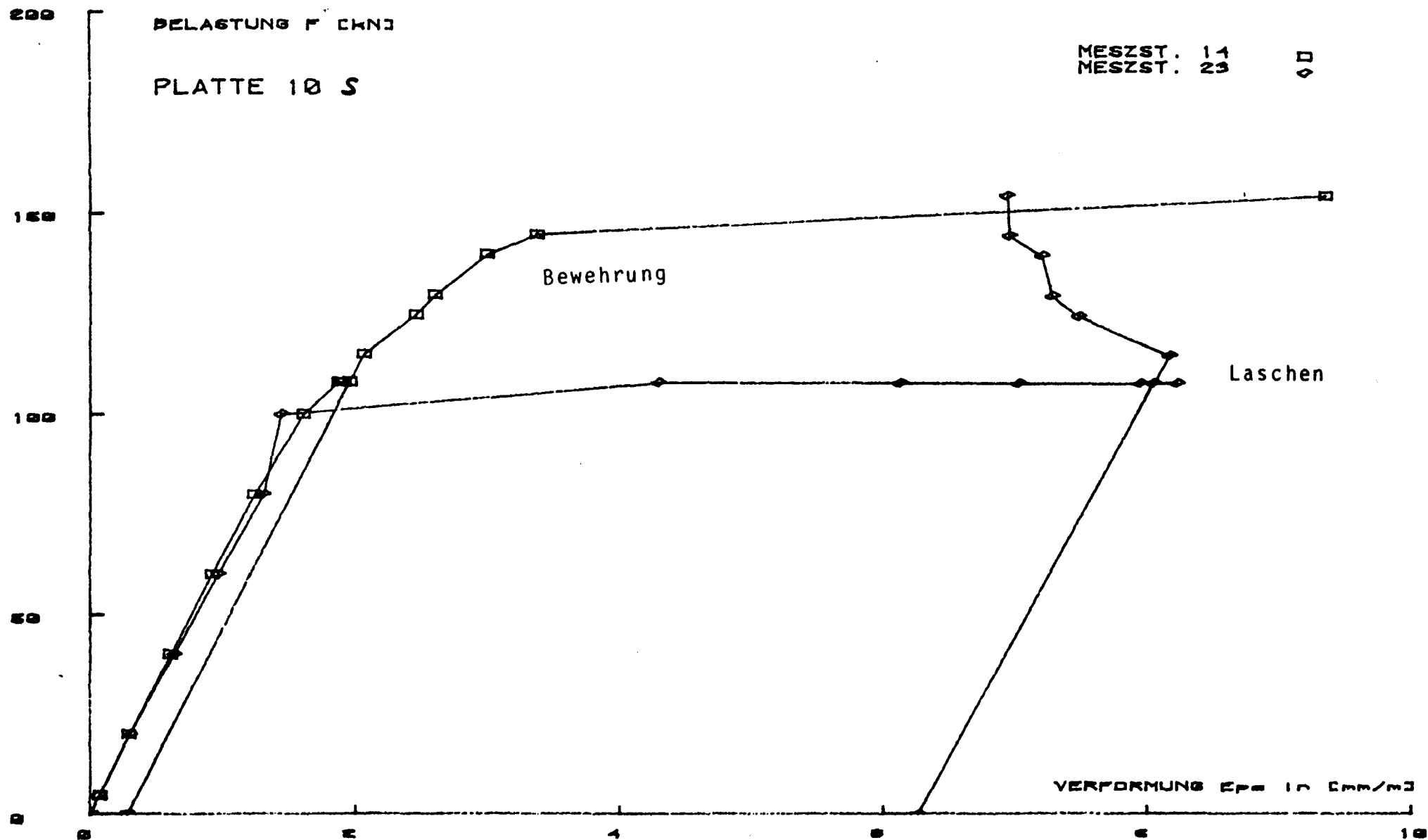


Bild 8.9.6: Maximale Dehnungen der Bewehrung und der Laschen  
im Riß in Abhängigkeit von der Belastung bei  
Platte 10 S

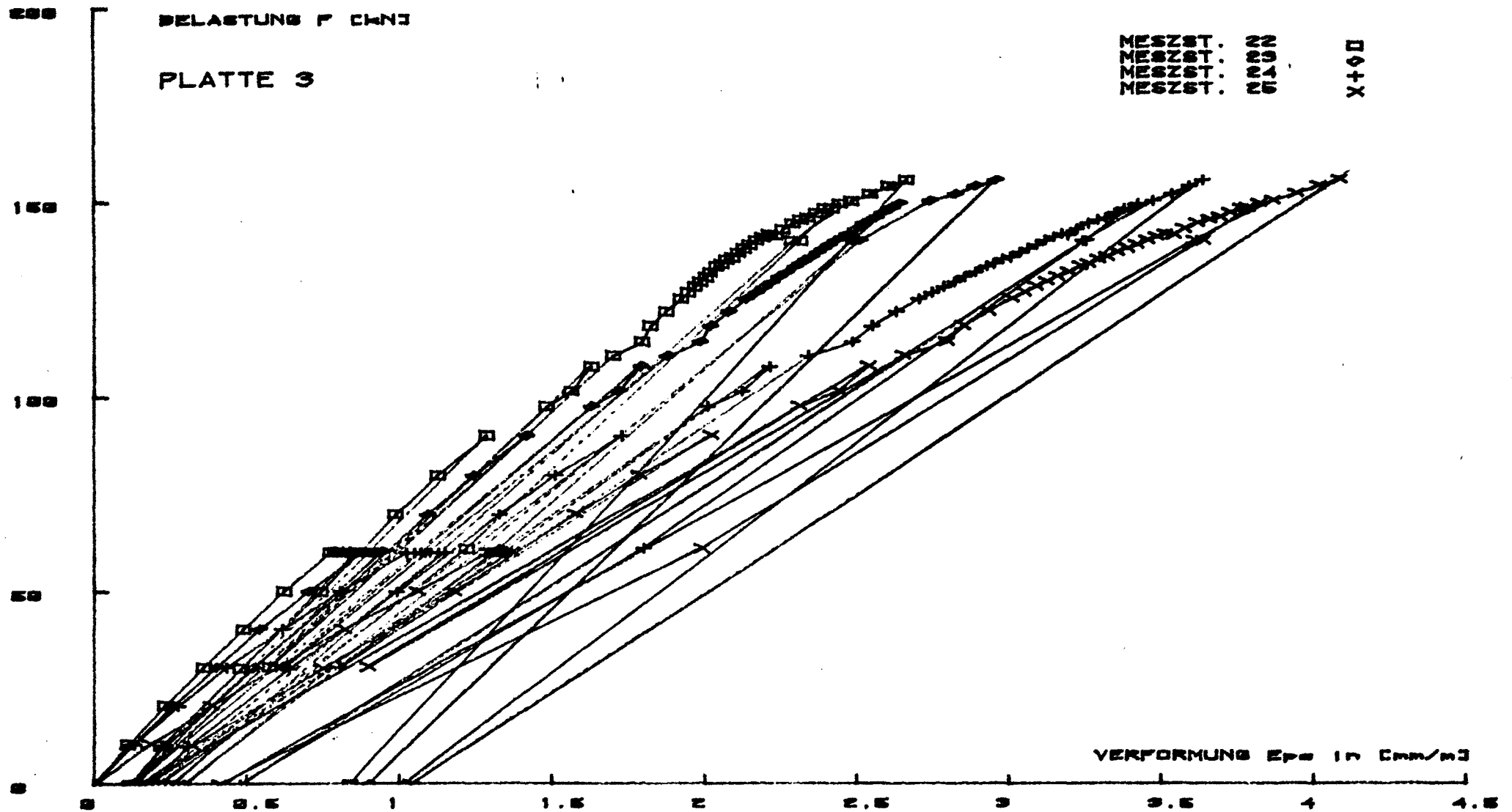


Bild 8.10.1: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Ab-  
 hängigkeit von der Belastung bei Platte 3

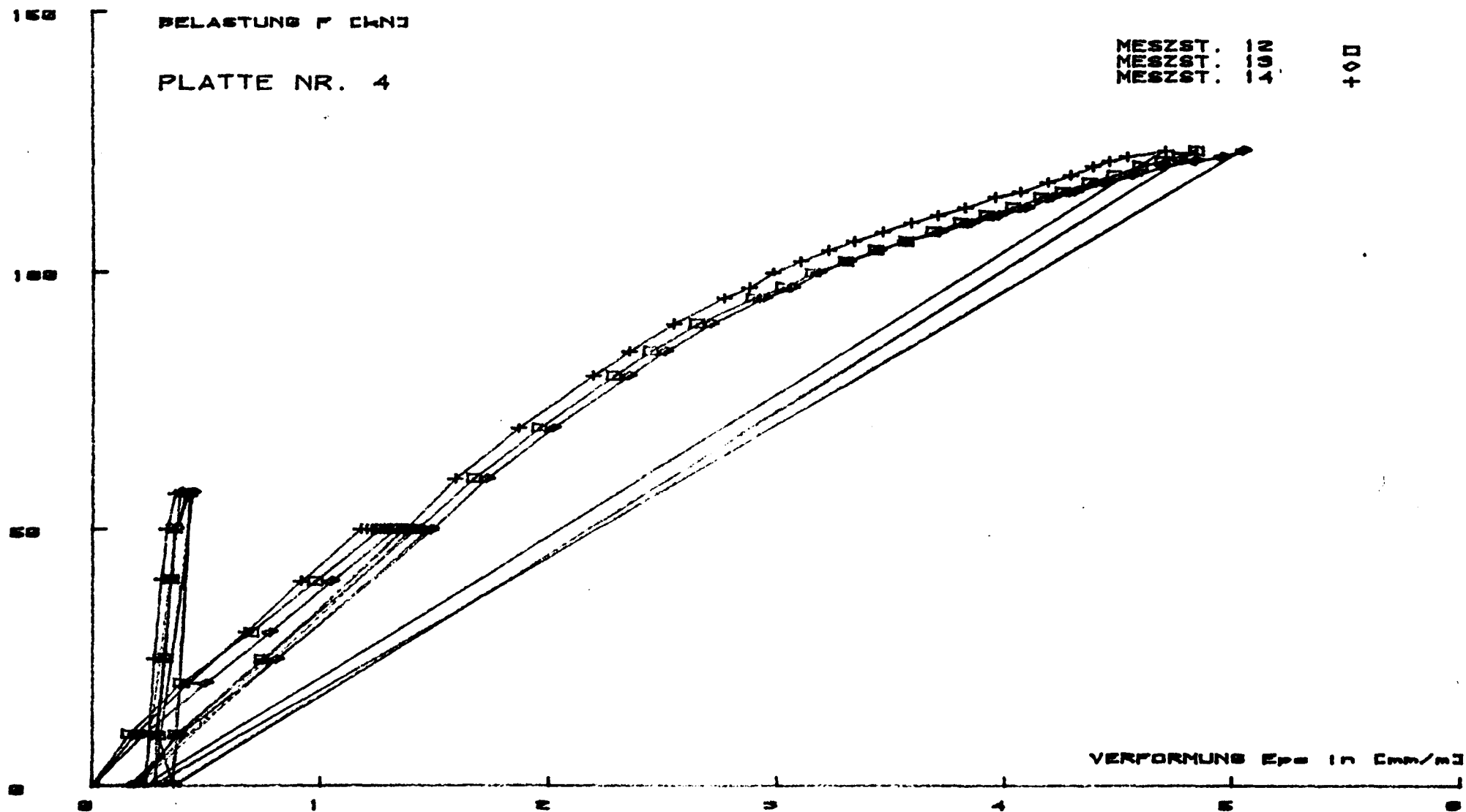


Bild 8.10.2: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 4

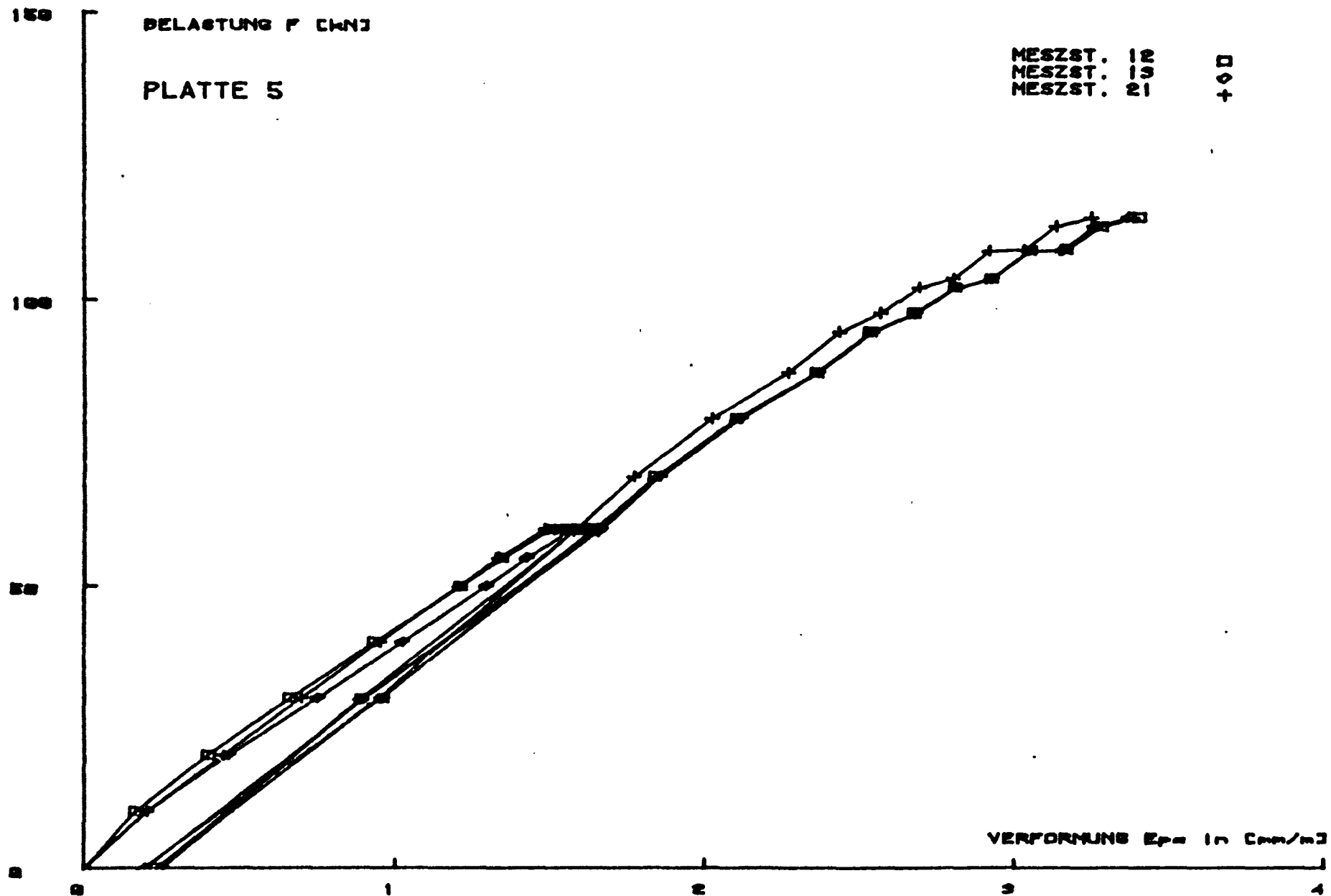


Bild 8.10.3: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 5

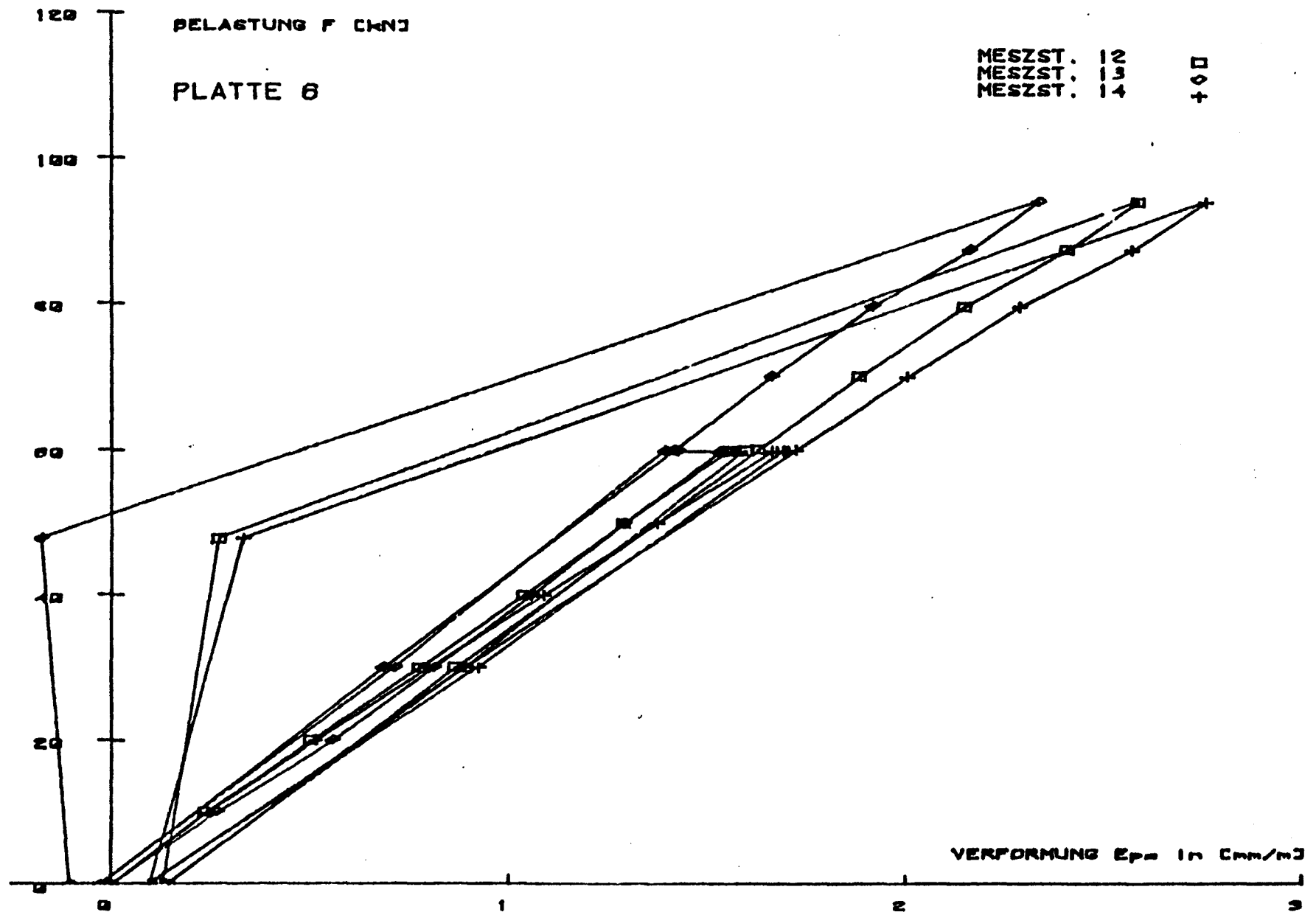


Bild 8.10.4: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 6

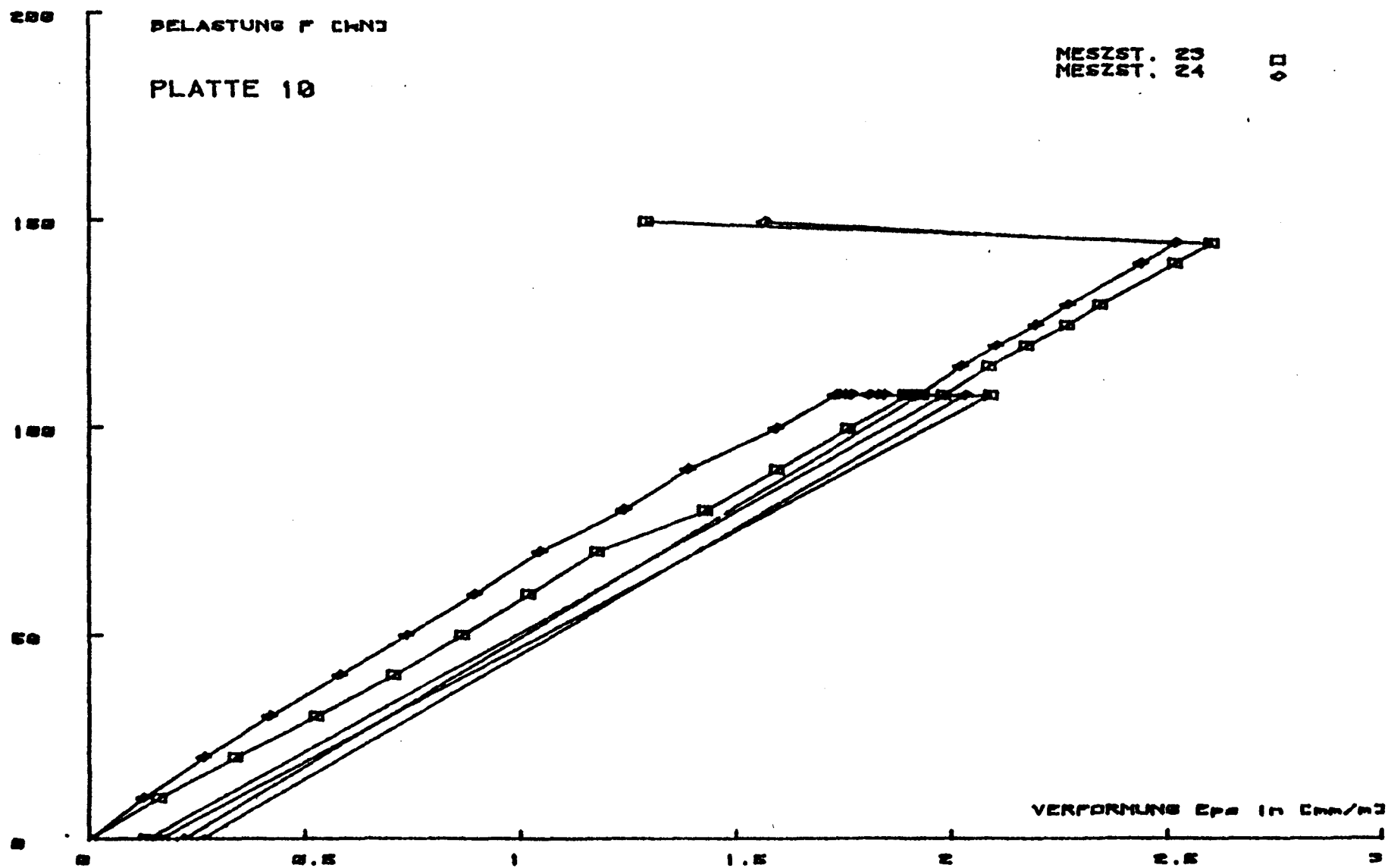


Bild 8.10.5: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 10



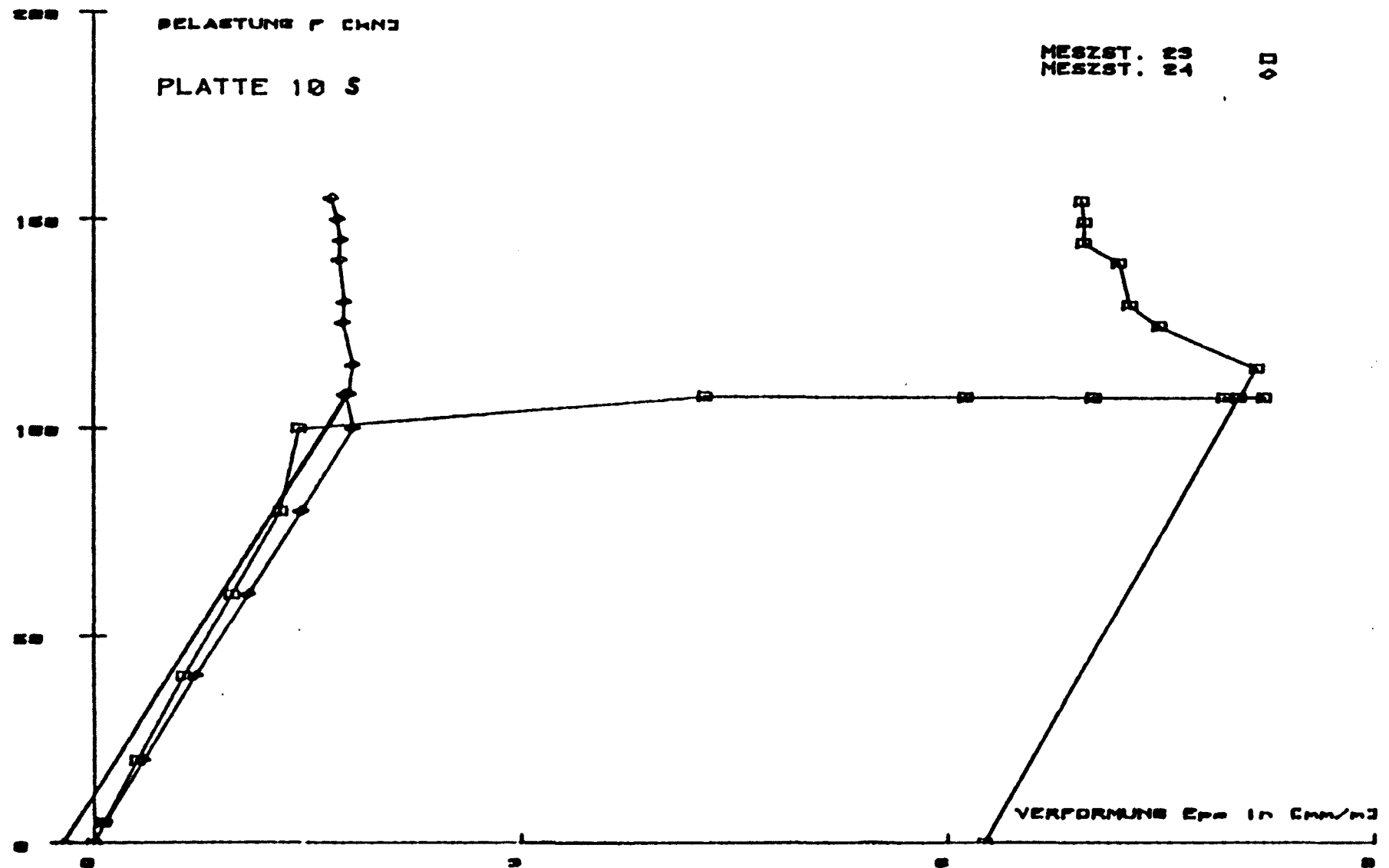


Bild 8.10.6: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 10 S

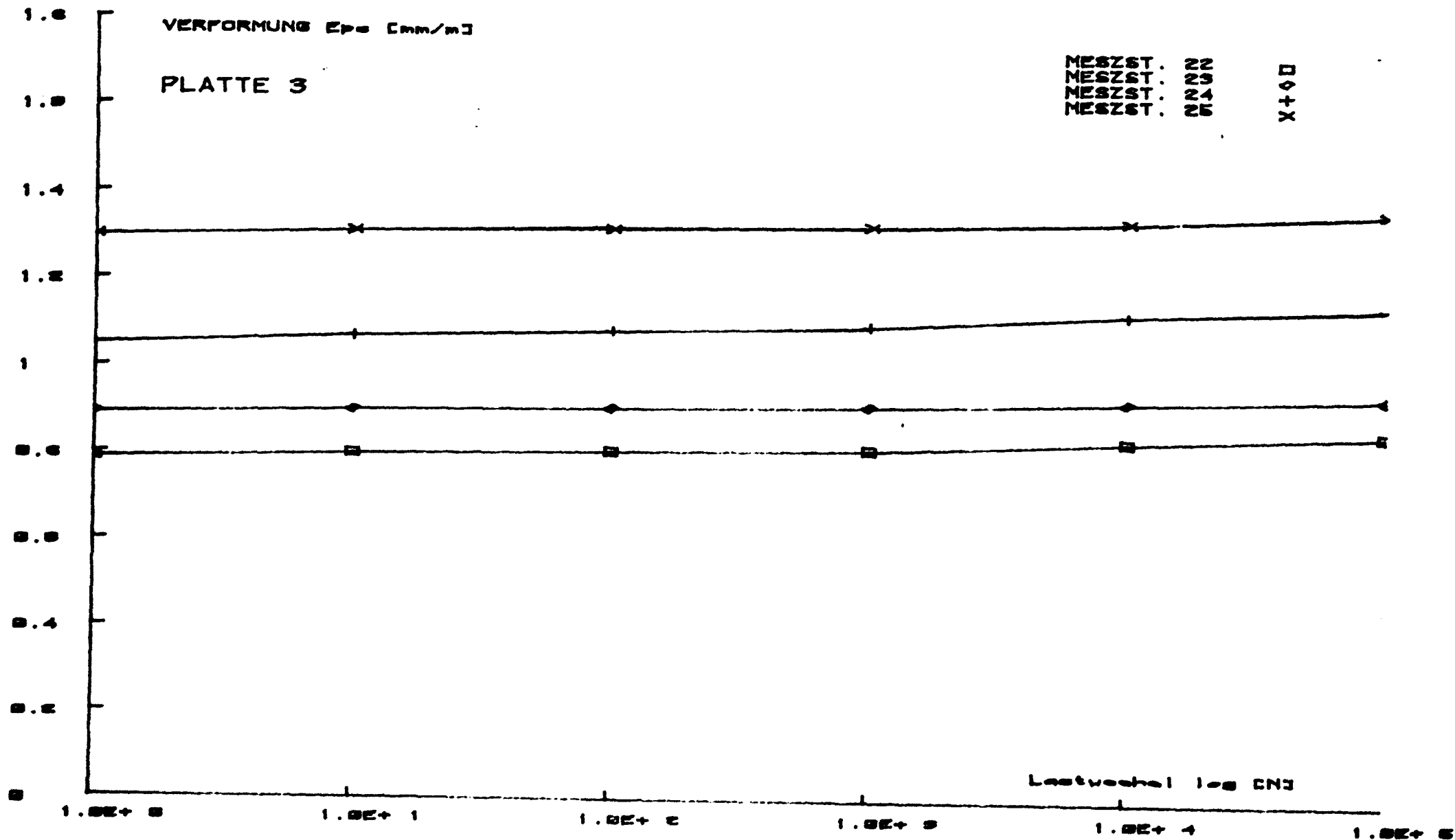


Bild 8.11.1: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 3

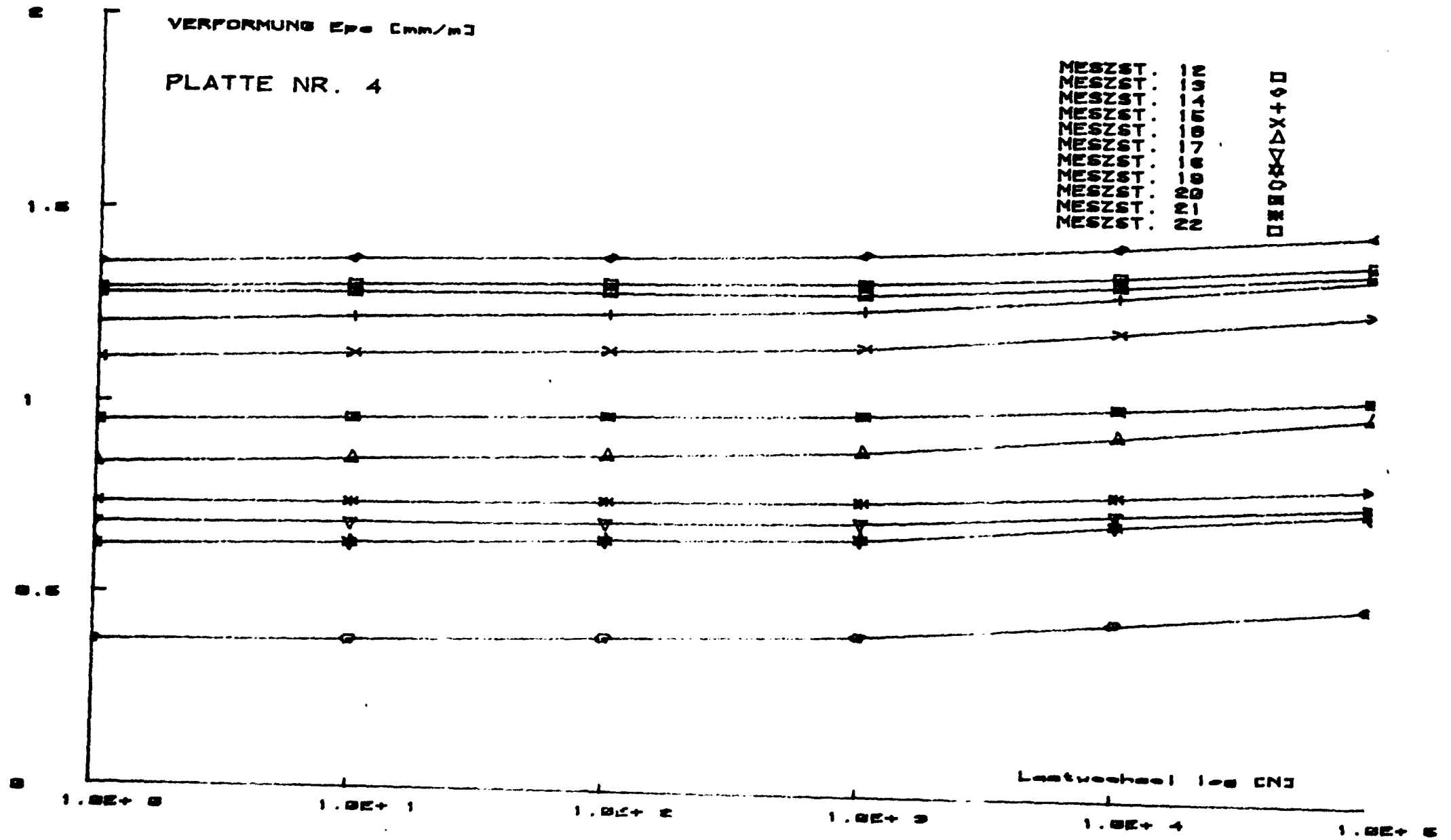


Bild 8.11.2: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 4

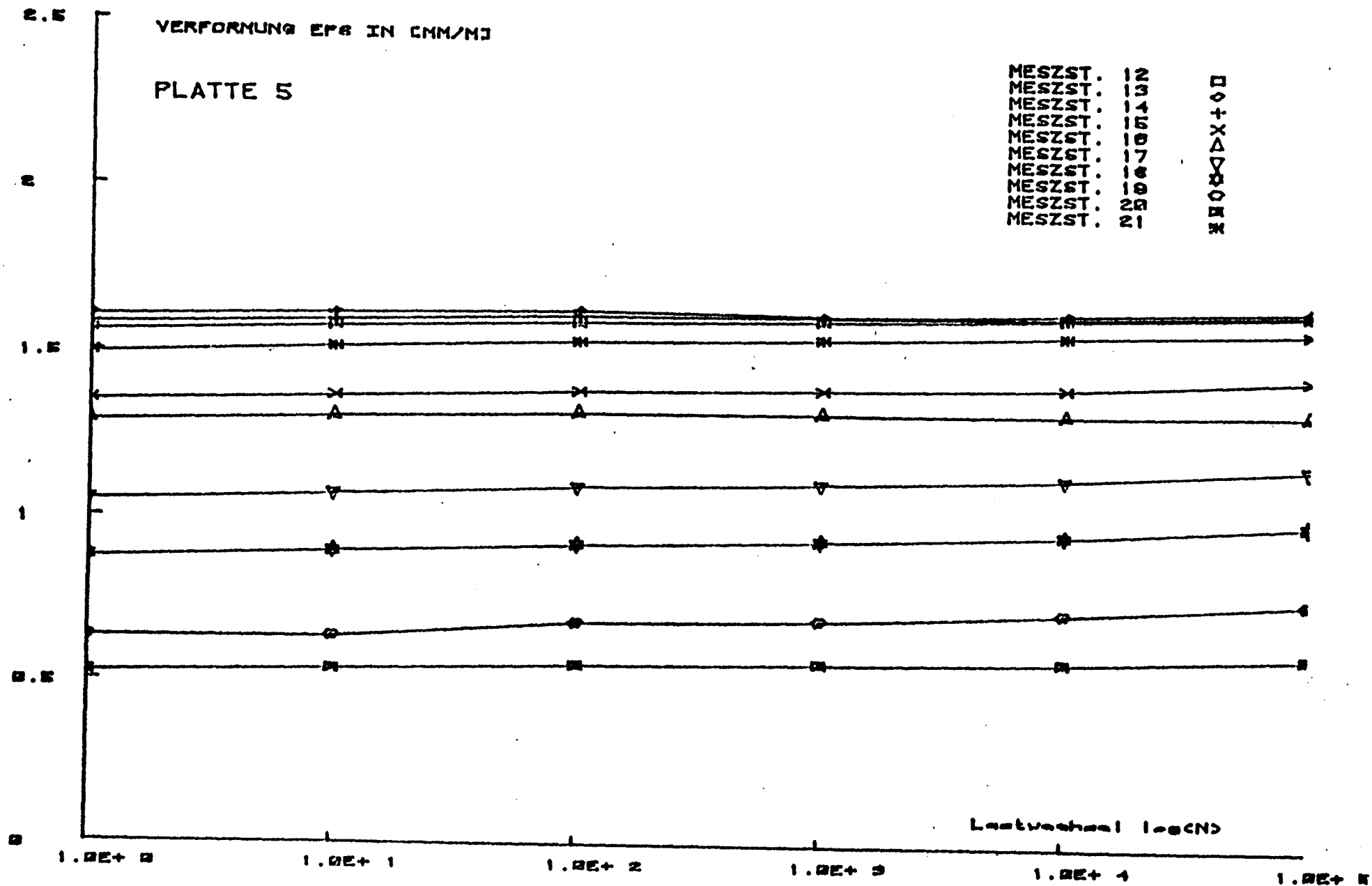


Bild 8.11.3: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 5

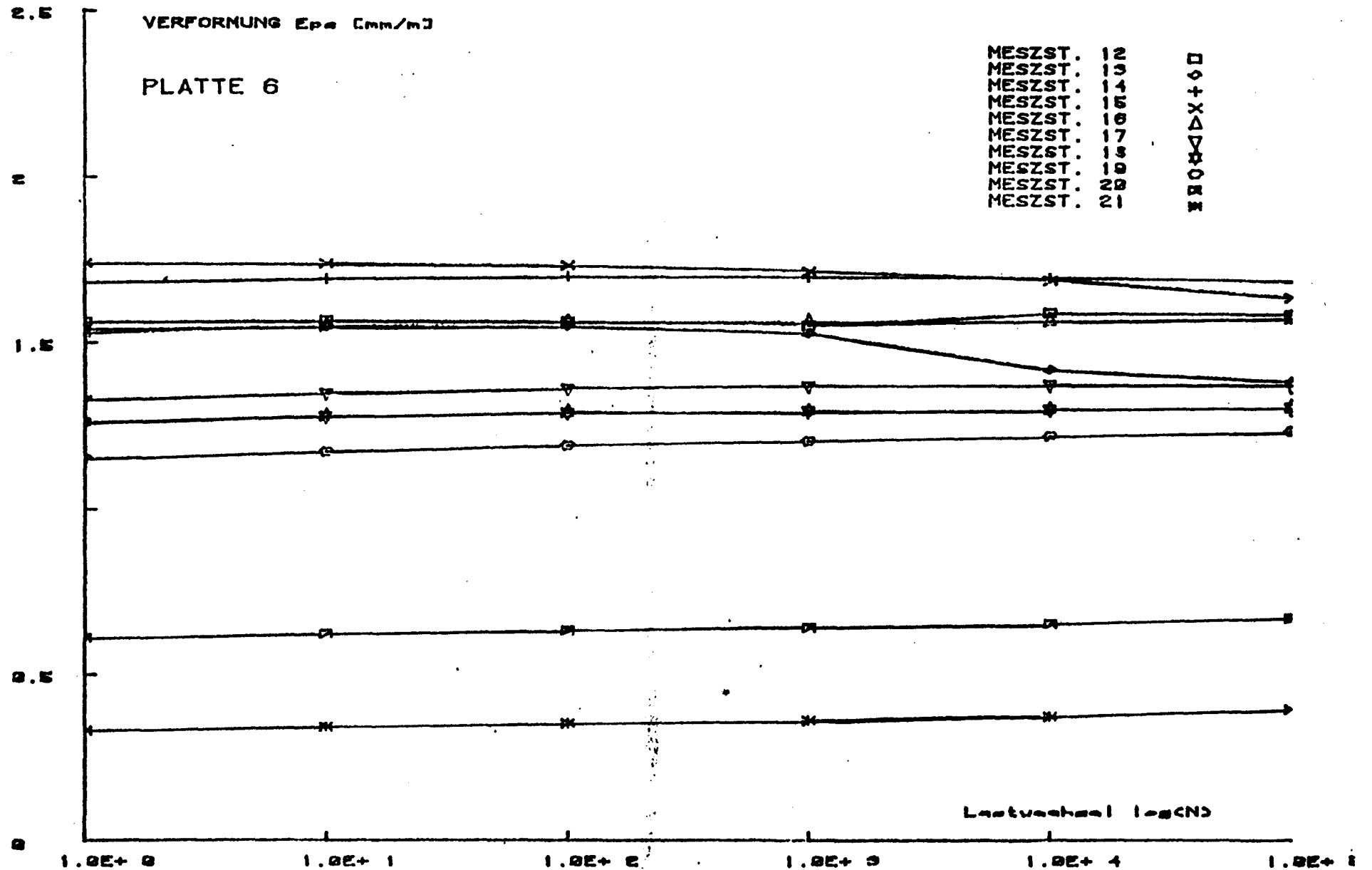


Bild 8.11.4: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 6

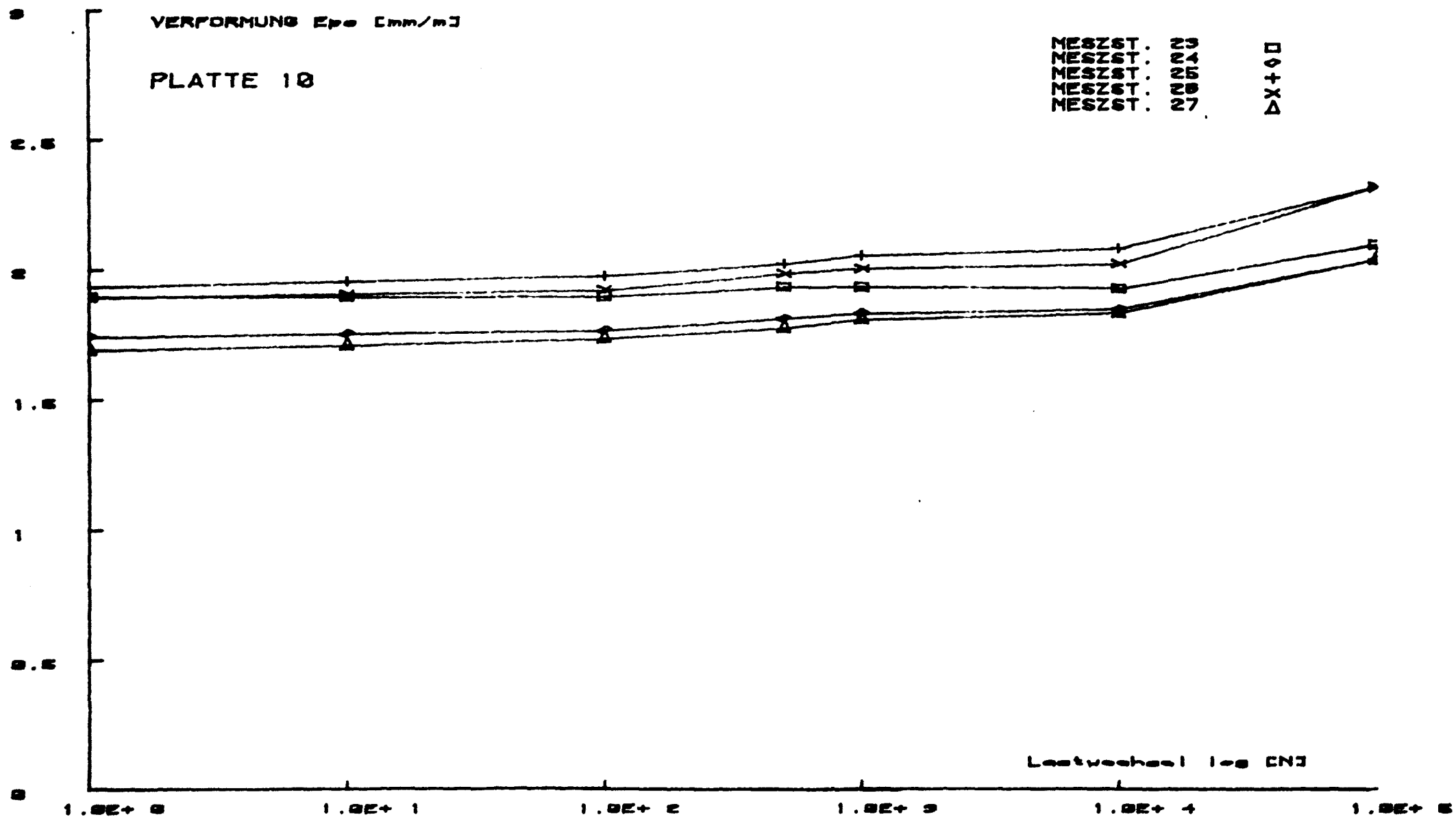


Bild 8.11.5: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 10

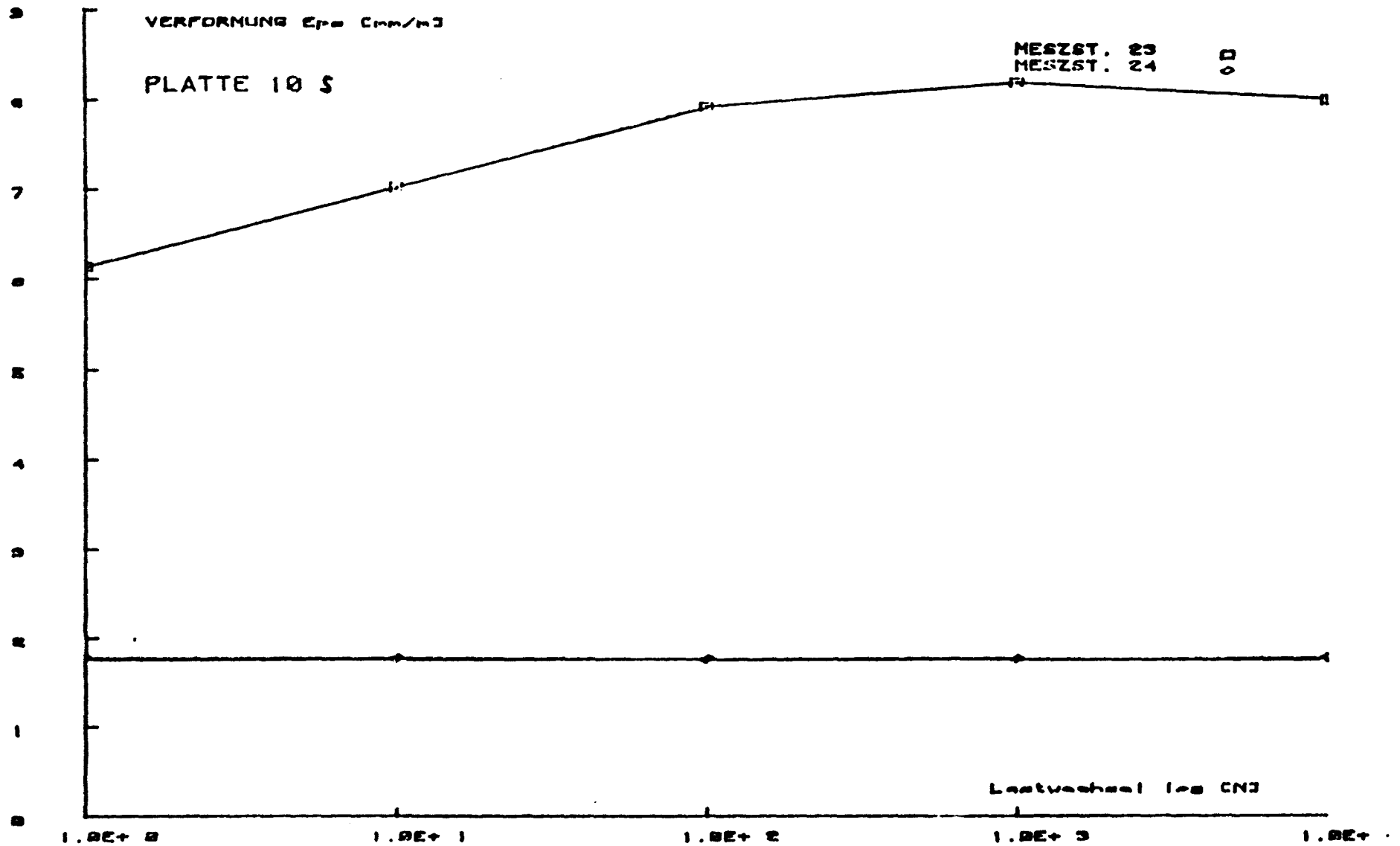


Bild 8.11.6: Laschendehnungen im Verankerungsbereich in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 10 S

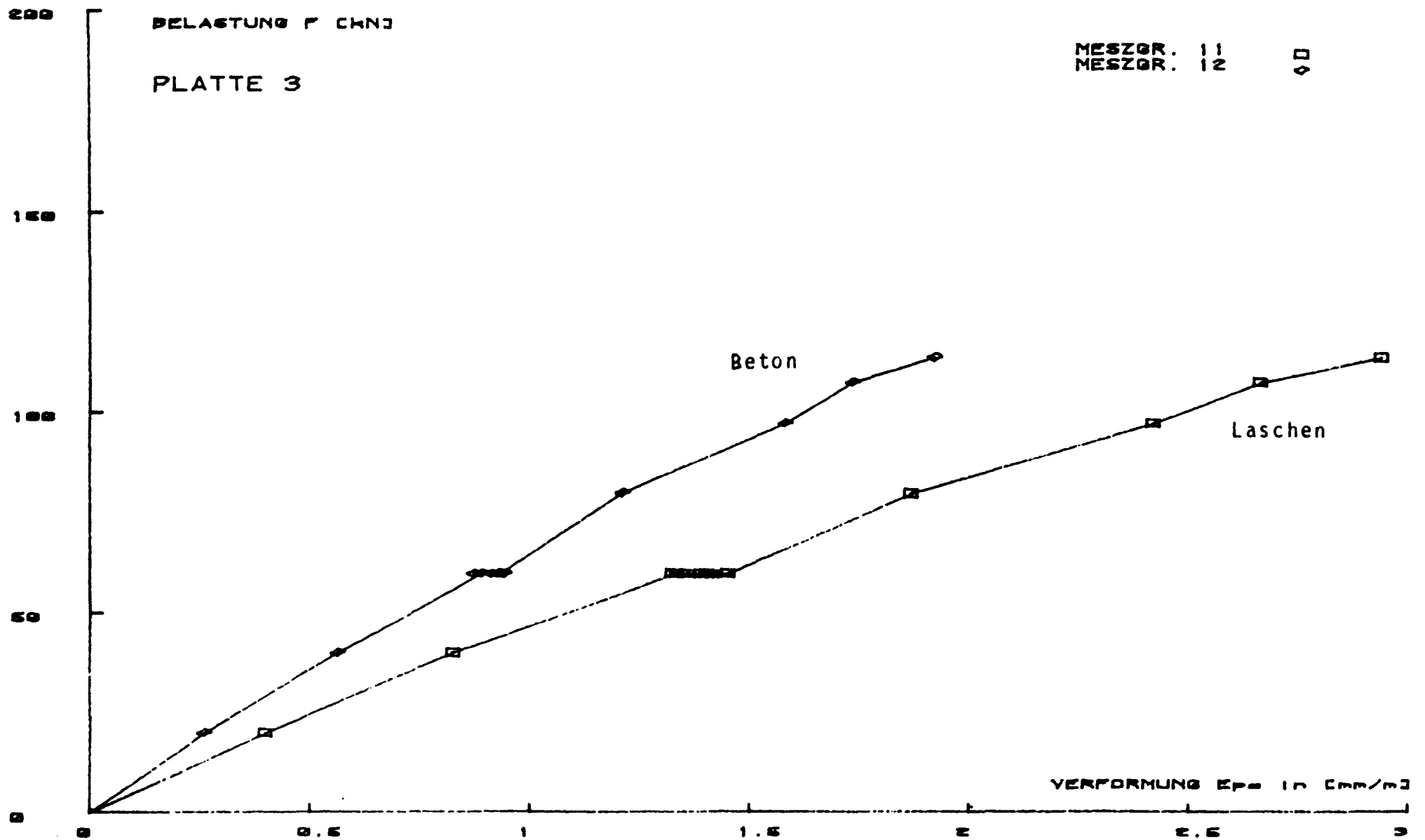


Bild 8.12.1: Mittlere Dehnungen des Betons und der Laschen in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 3



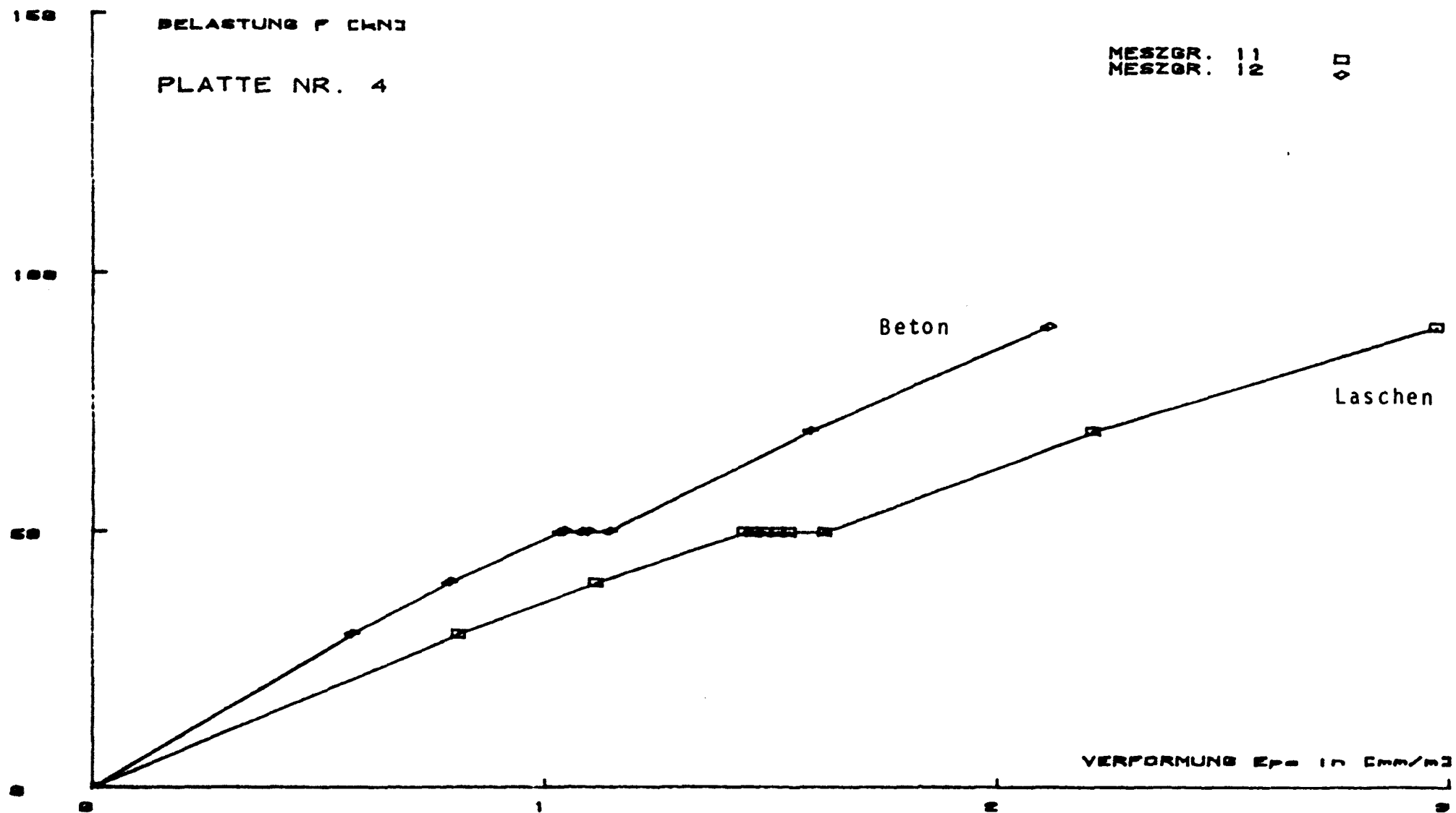


Bild 8.12.2: Mittlere Dehnungen des Betons und der Laschen in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 4

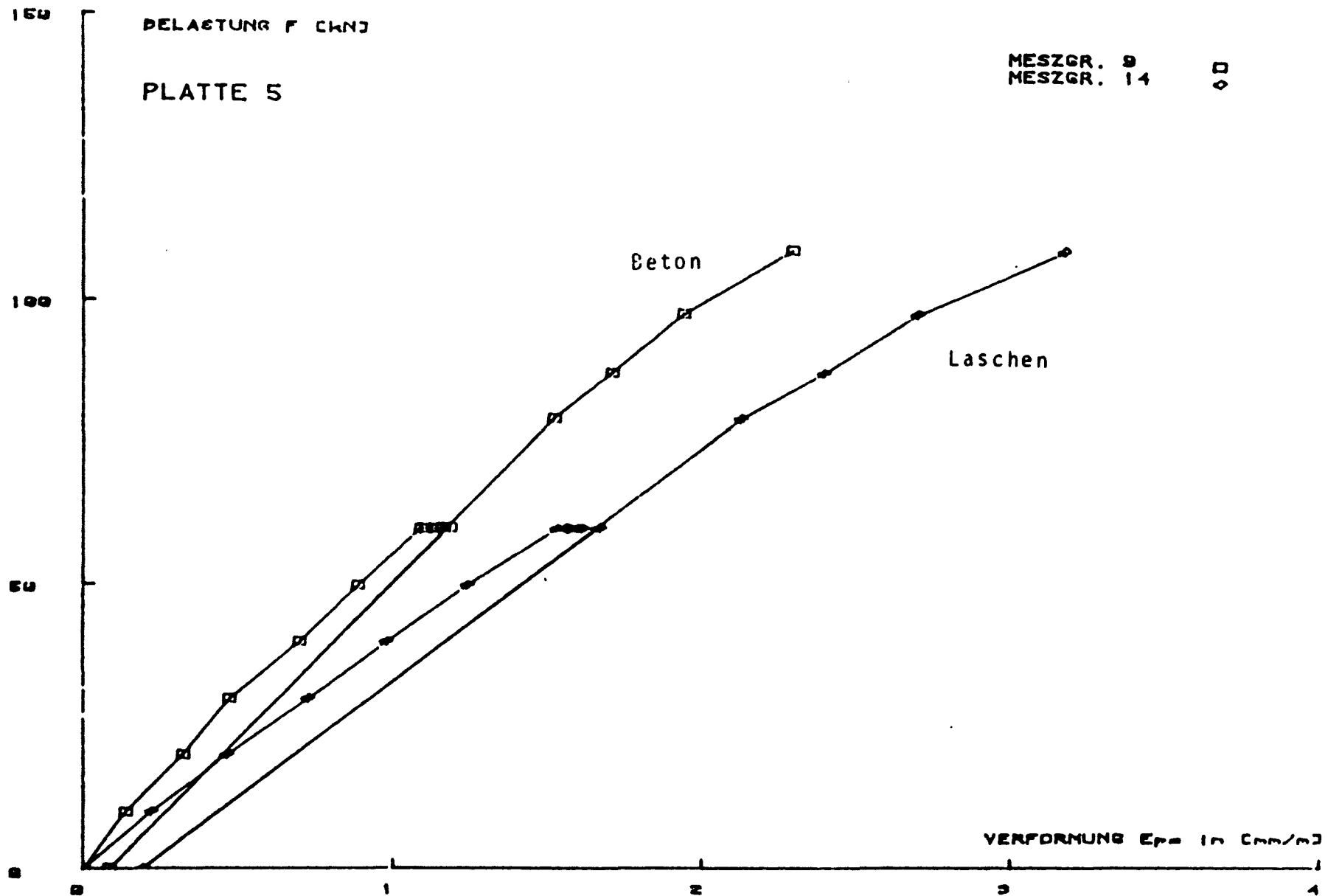


Bild 8.12.3: Mittlere Dehnungen des Betons und der Laschen in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 5

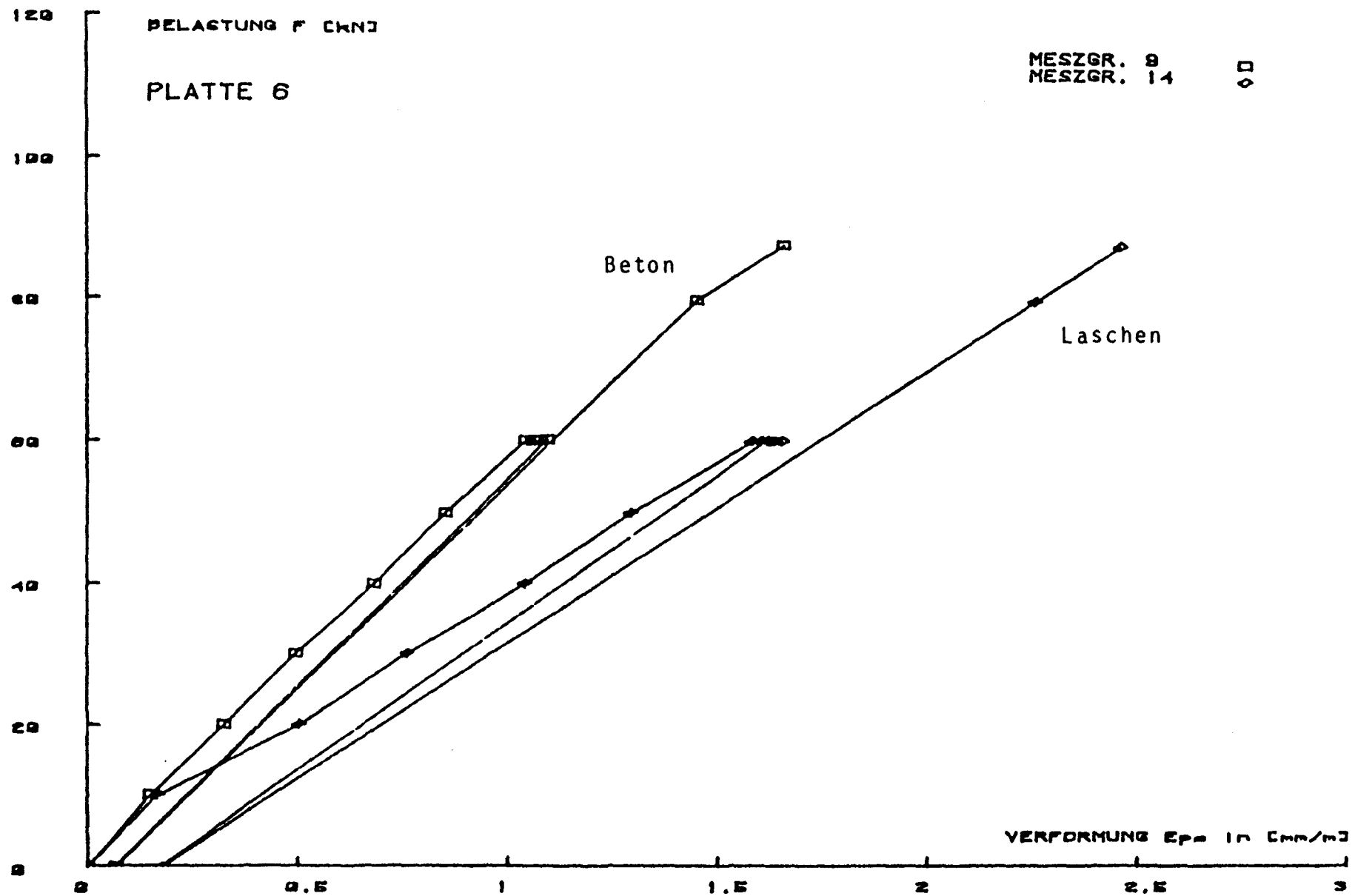


Bild 8.12.4: Mittlere Dehnungen des Betons und der Laschen in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 6

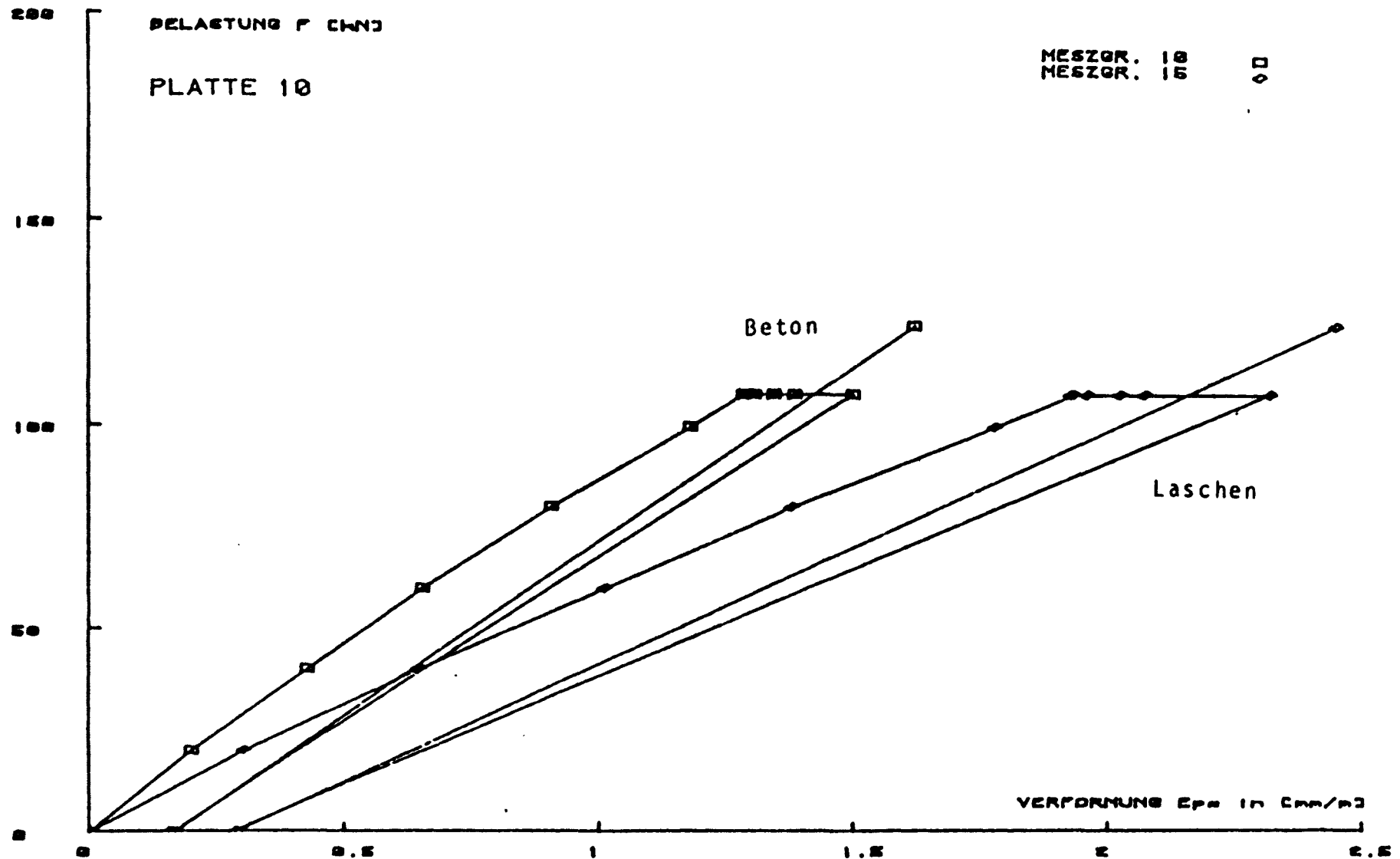


Bild 8.12.5: Mittlere Dehnungen des Betons und der Laschen in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 10

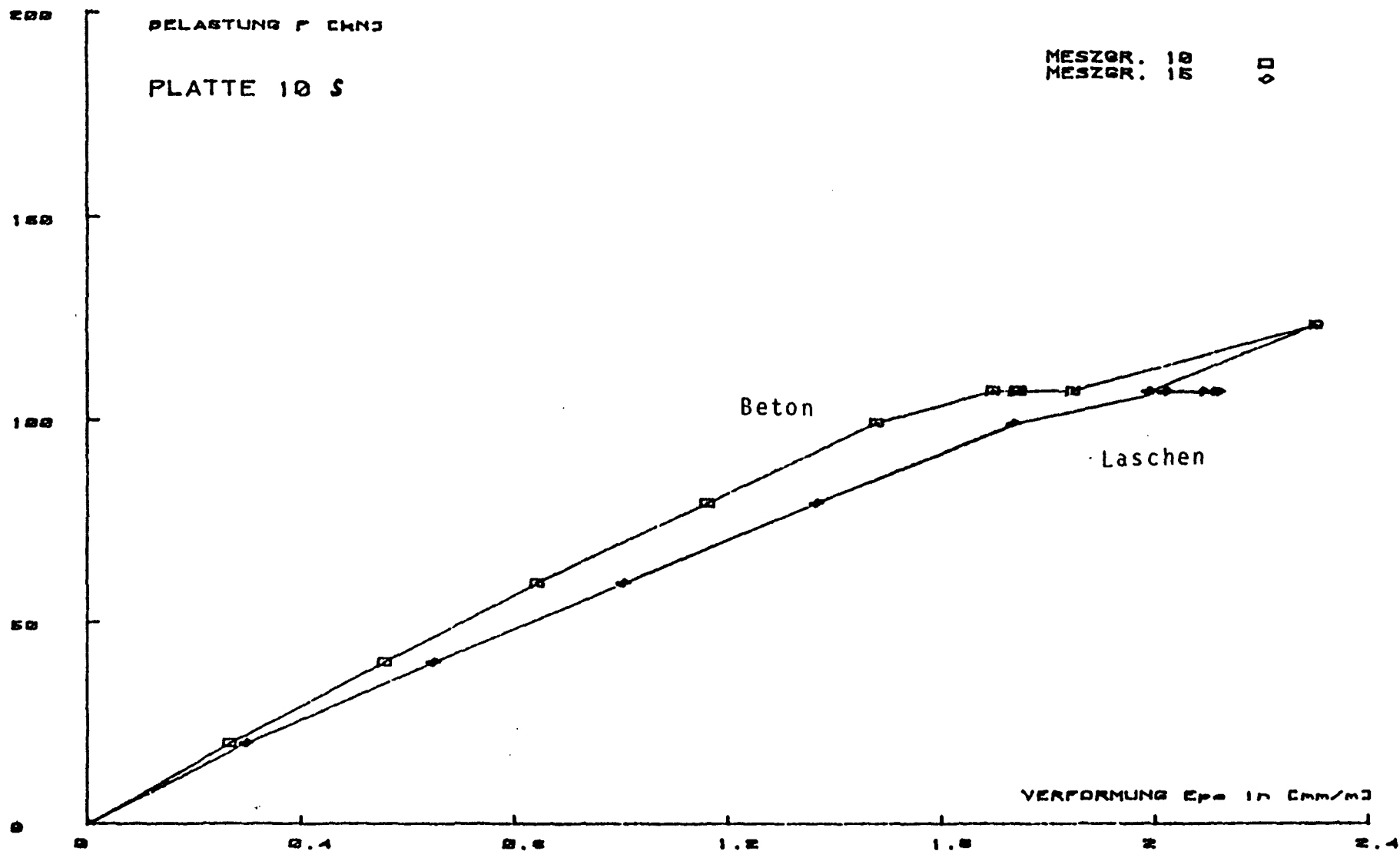


Bild 8.12.6: Mittlere Dehnungen des Betons und der Laschen in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 10 S

# Platte 3

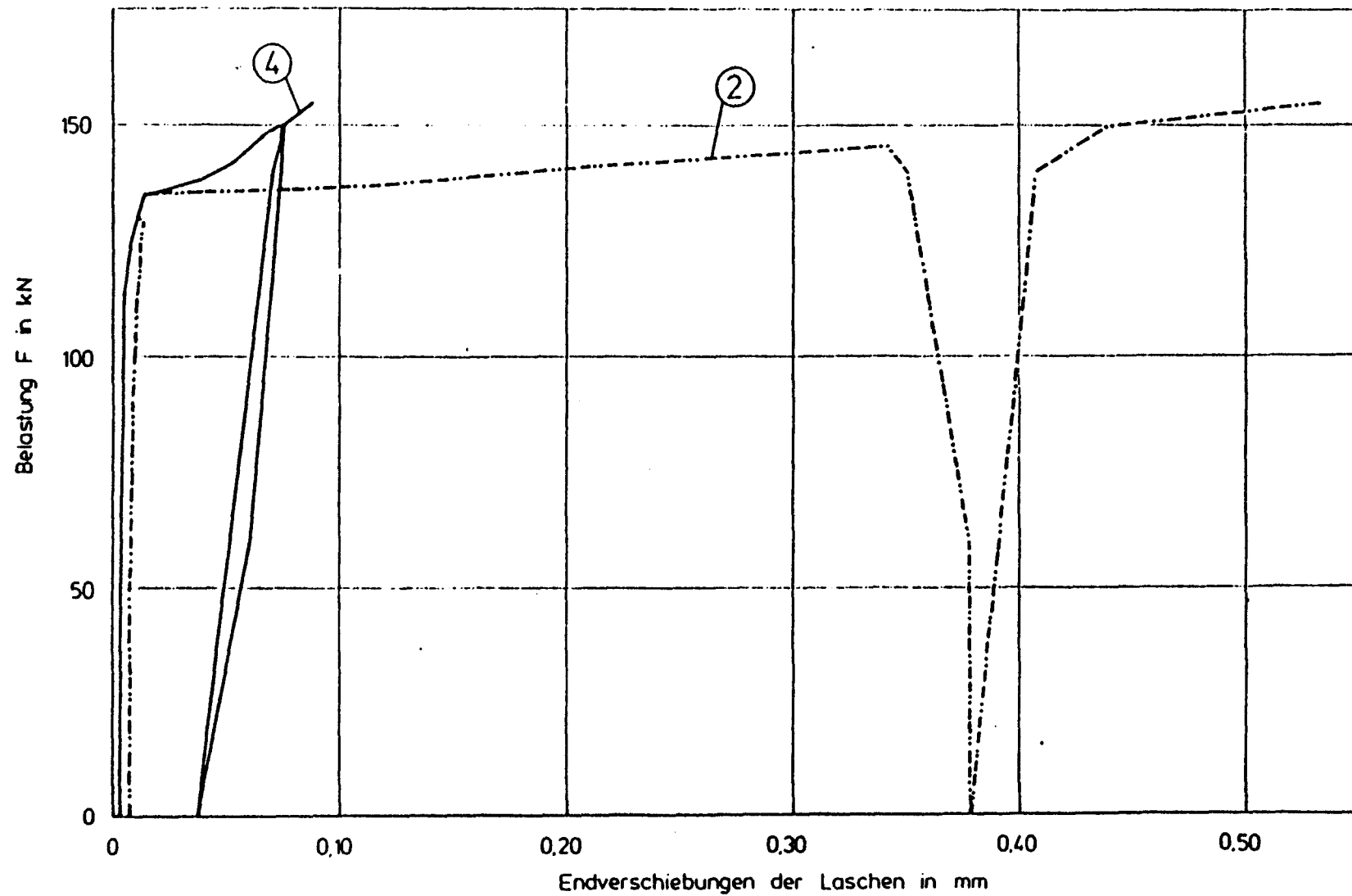


Bild 8.13.1: Endverschiebungen der Laschen im Bruchversuch in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 3

# Platte 4

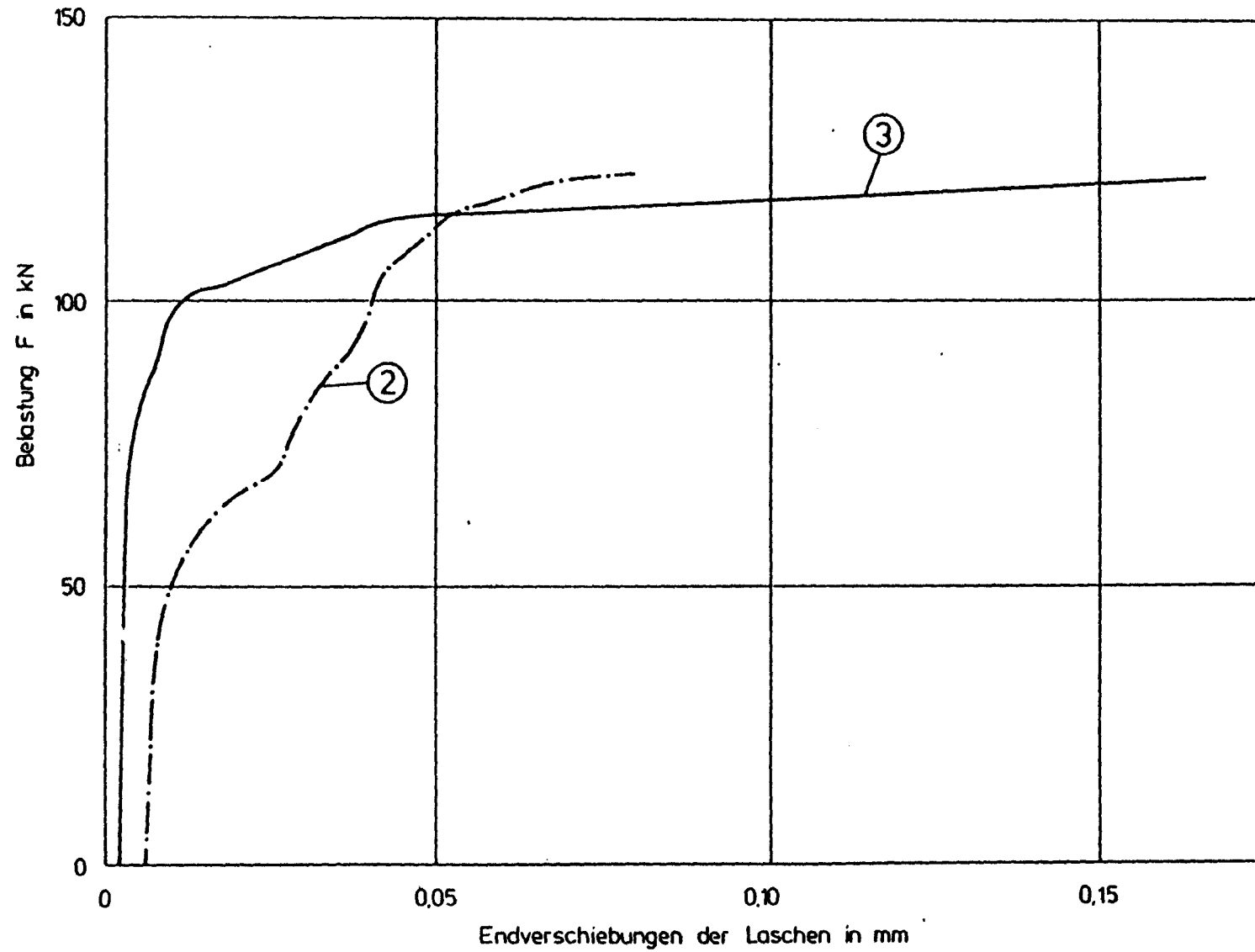


Bild 8.13.2: Endverschiebungen der Laschen im Bruchversuch in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 4

# Platte 5

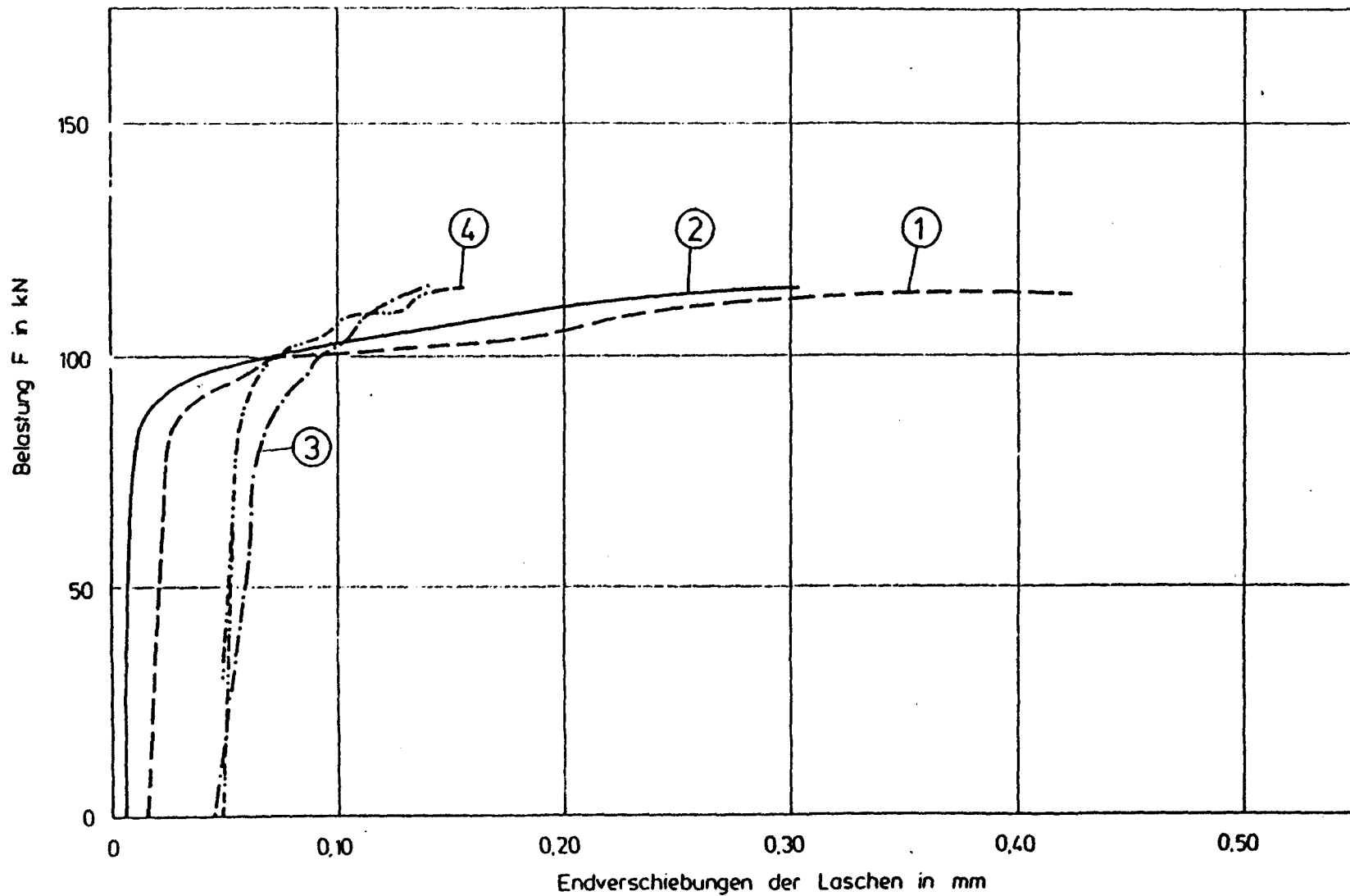


Bild 8.13.3: Endverschiebungen der Laschen im Bruchversuch in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 5



## Platte 6

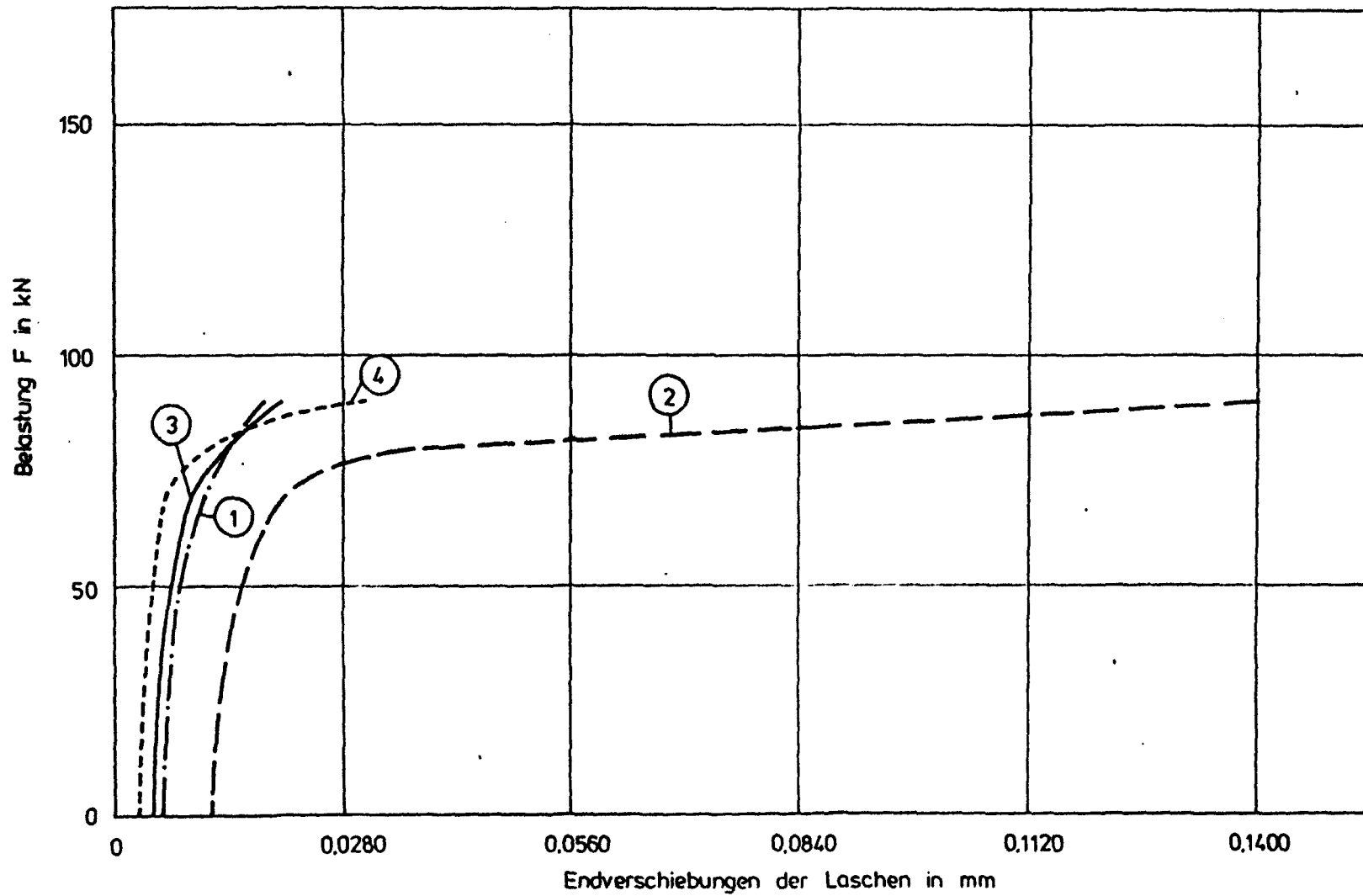


Bild 8.13.4: Endverschiebungen der Laschen im Bruchversuch  
in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 6

## Platte 10

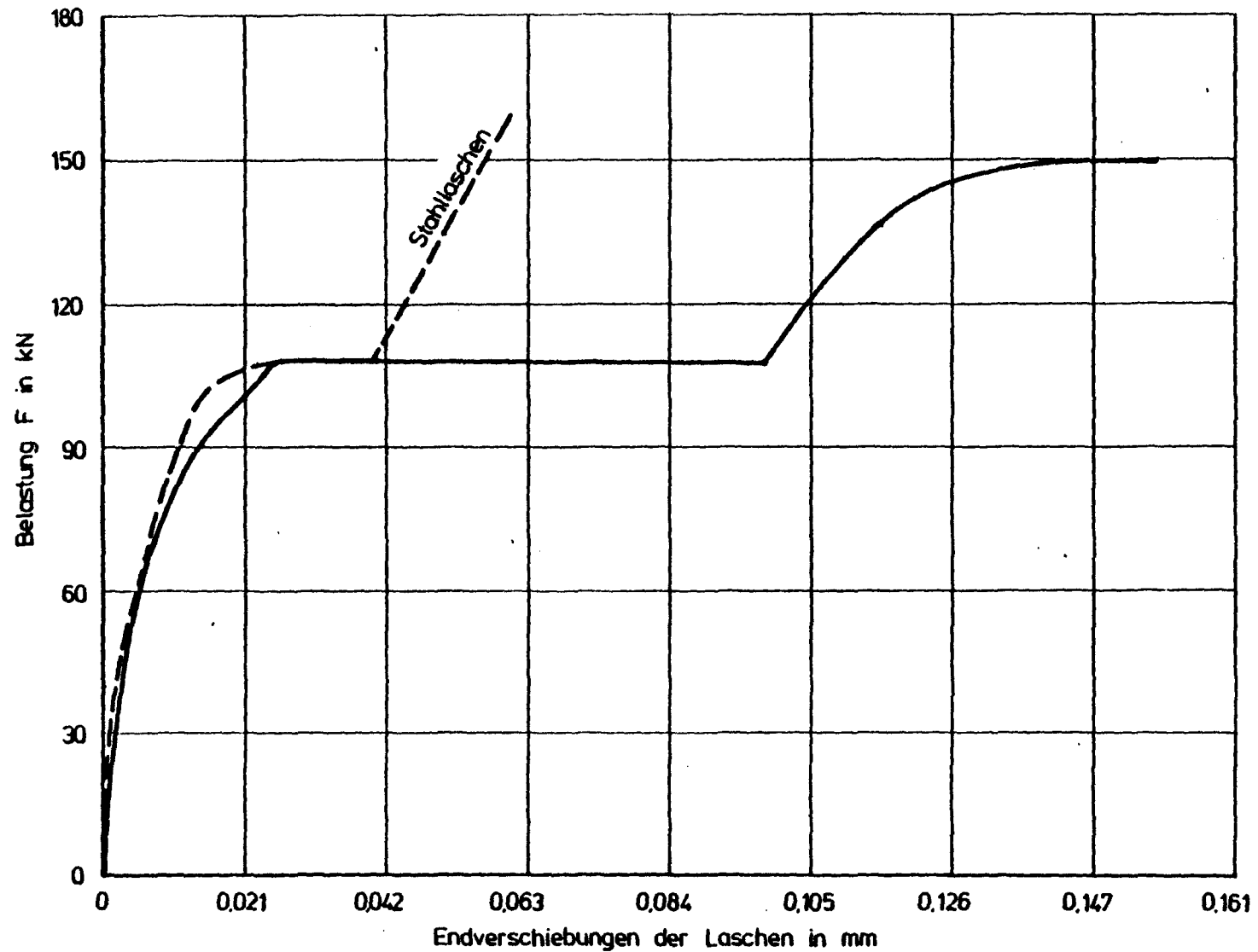


Bild 8.13.5: Maximale Endverschiebungen der Laschen im Bruchversuch in Abhängigkeit von der Belastung bei Platte 10 und 10 S

### Platte 3

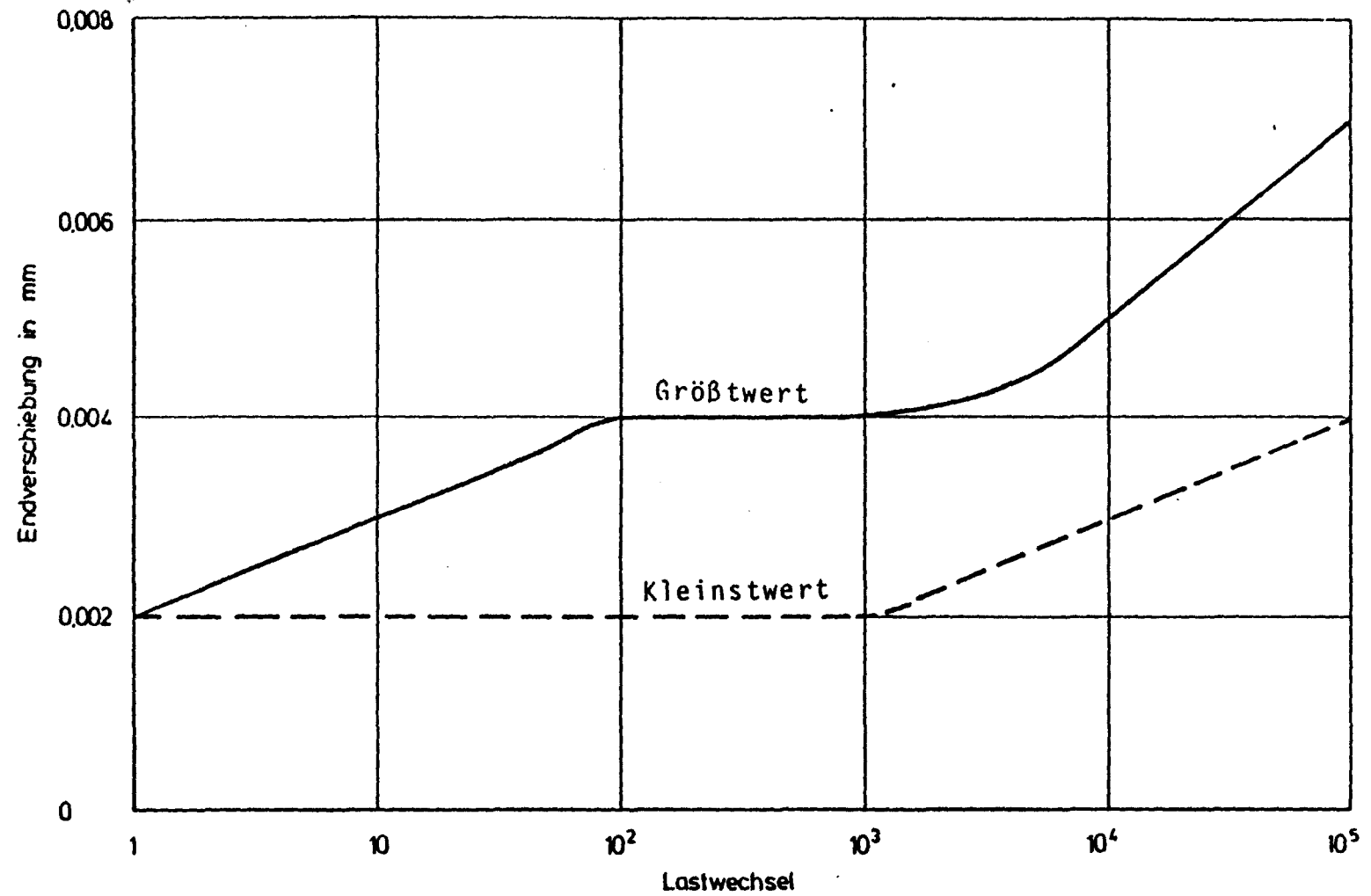


Bild 8.14.1: Maximale Endverschiebungen der Laschen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 3

## Platte 4

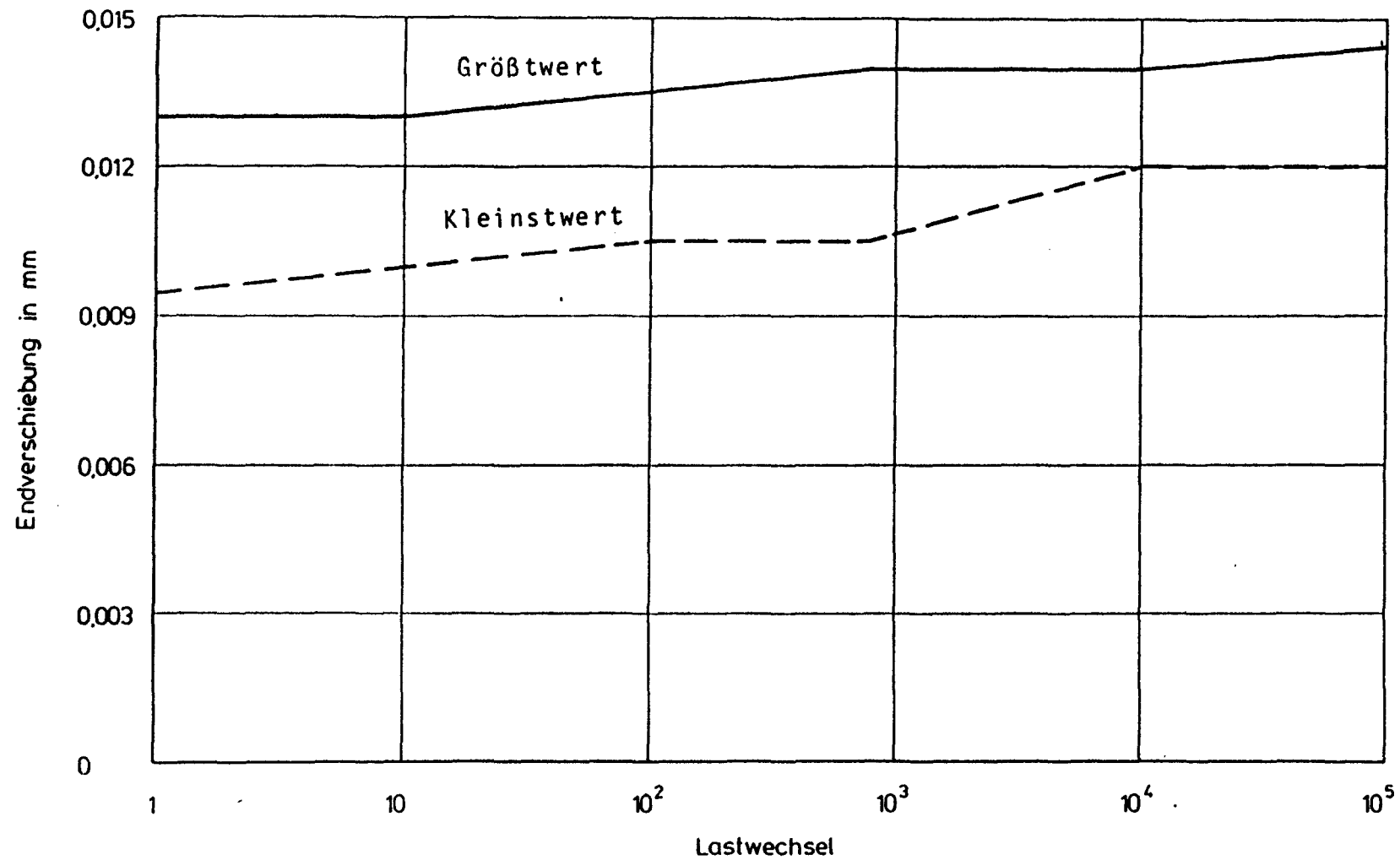


Bild 8.14.2: Maximale Endverschiebungen der Laschen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 4

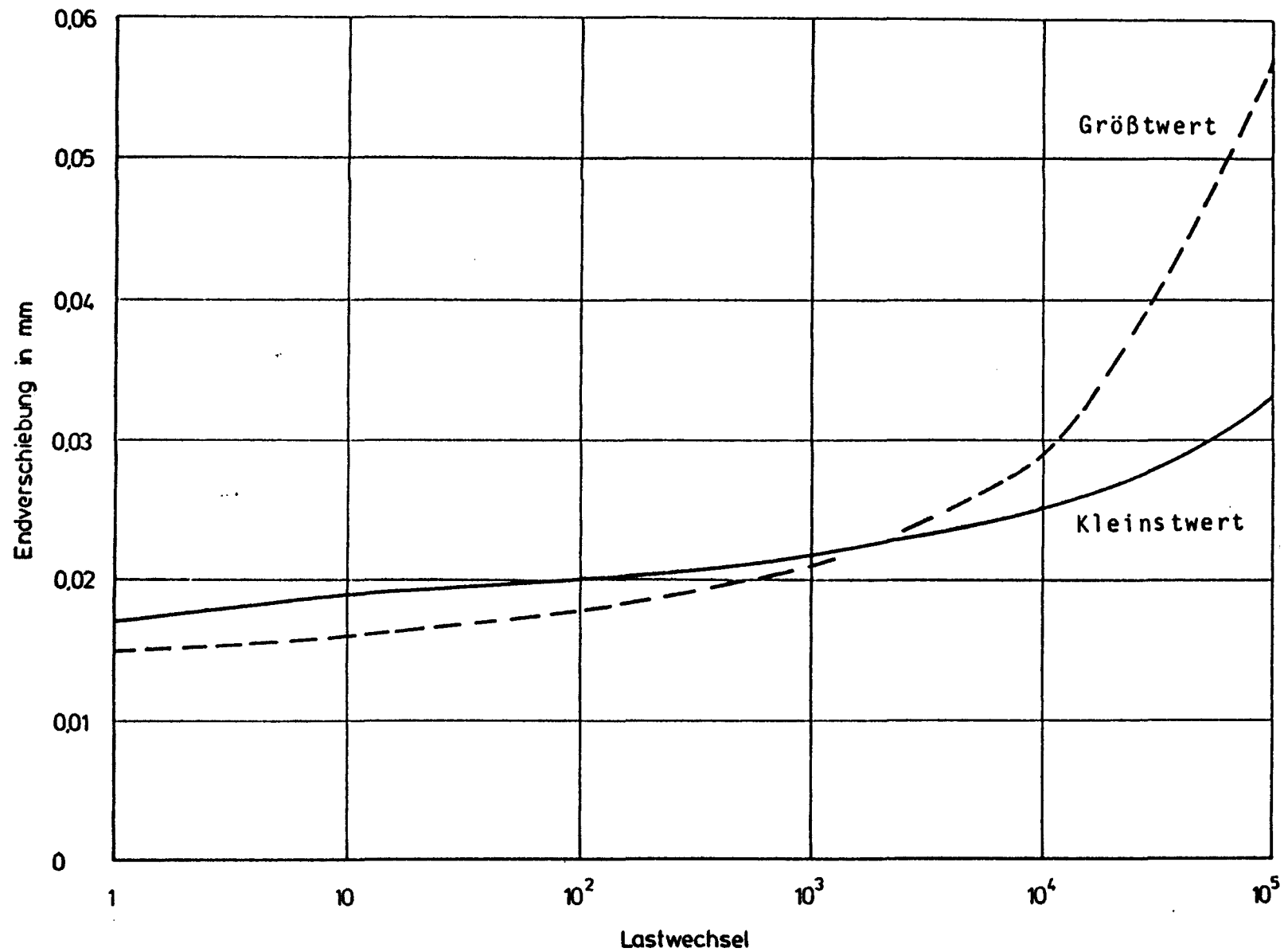


Bild 8.14.3: Maximale Endverschiebungen der Laschen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 5

## Platte 6

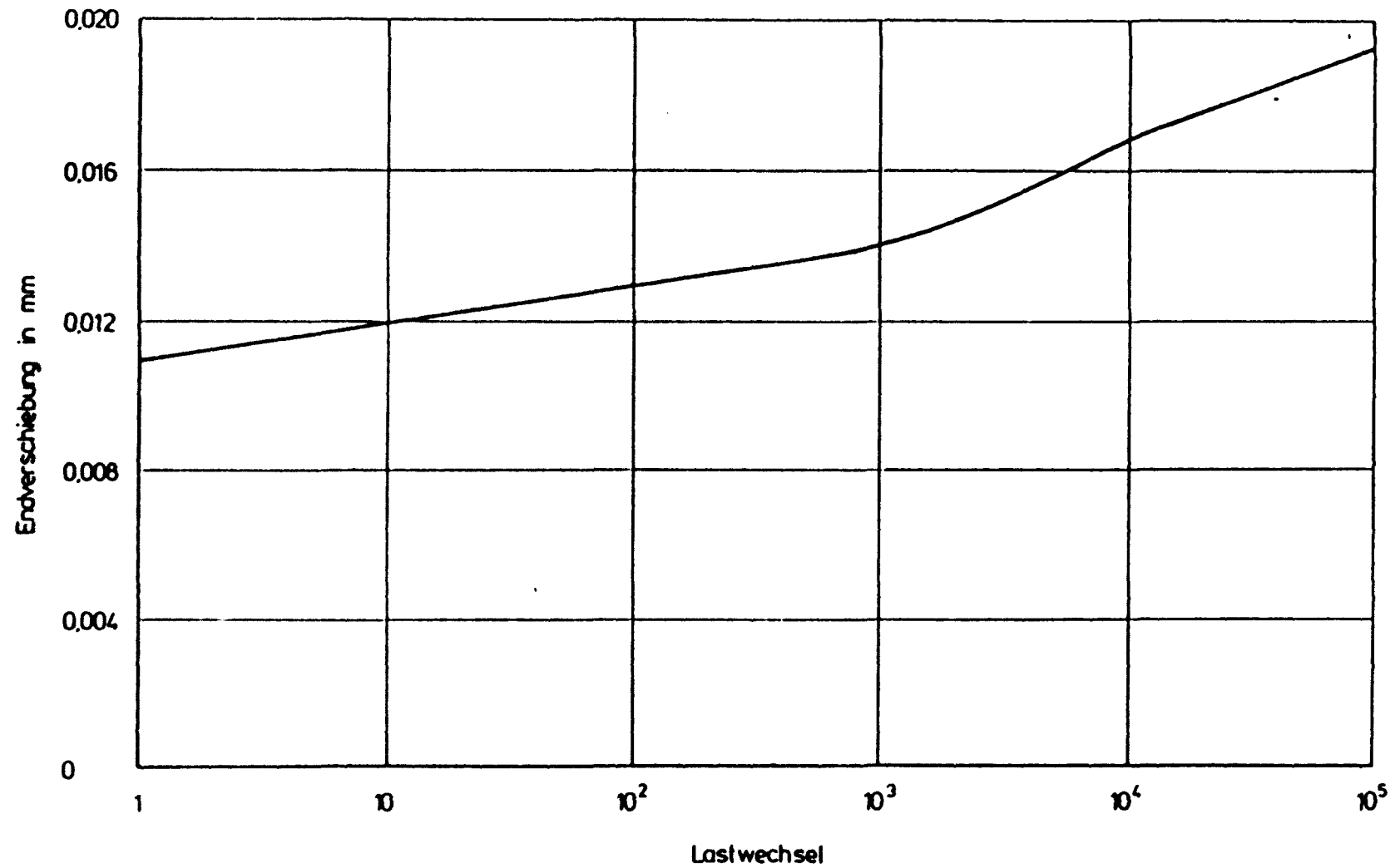


Bild 8.14.4: Maximale Endverschiebungen der Laschen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 6

## Platte 10

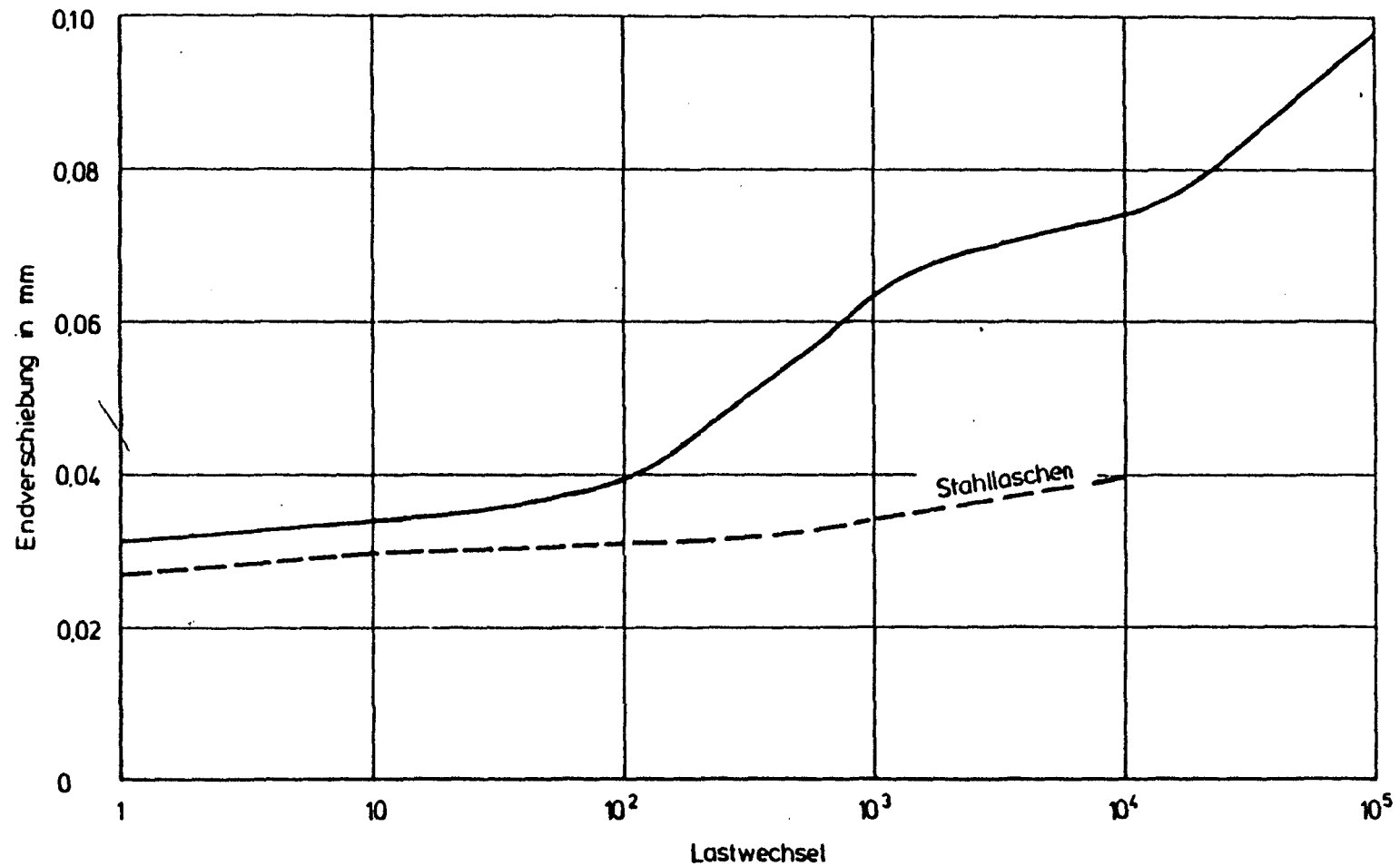
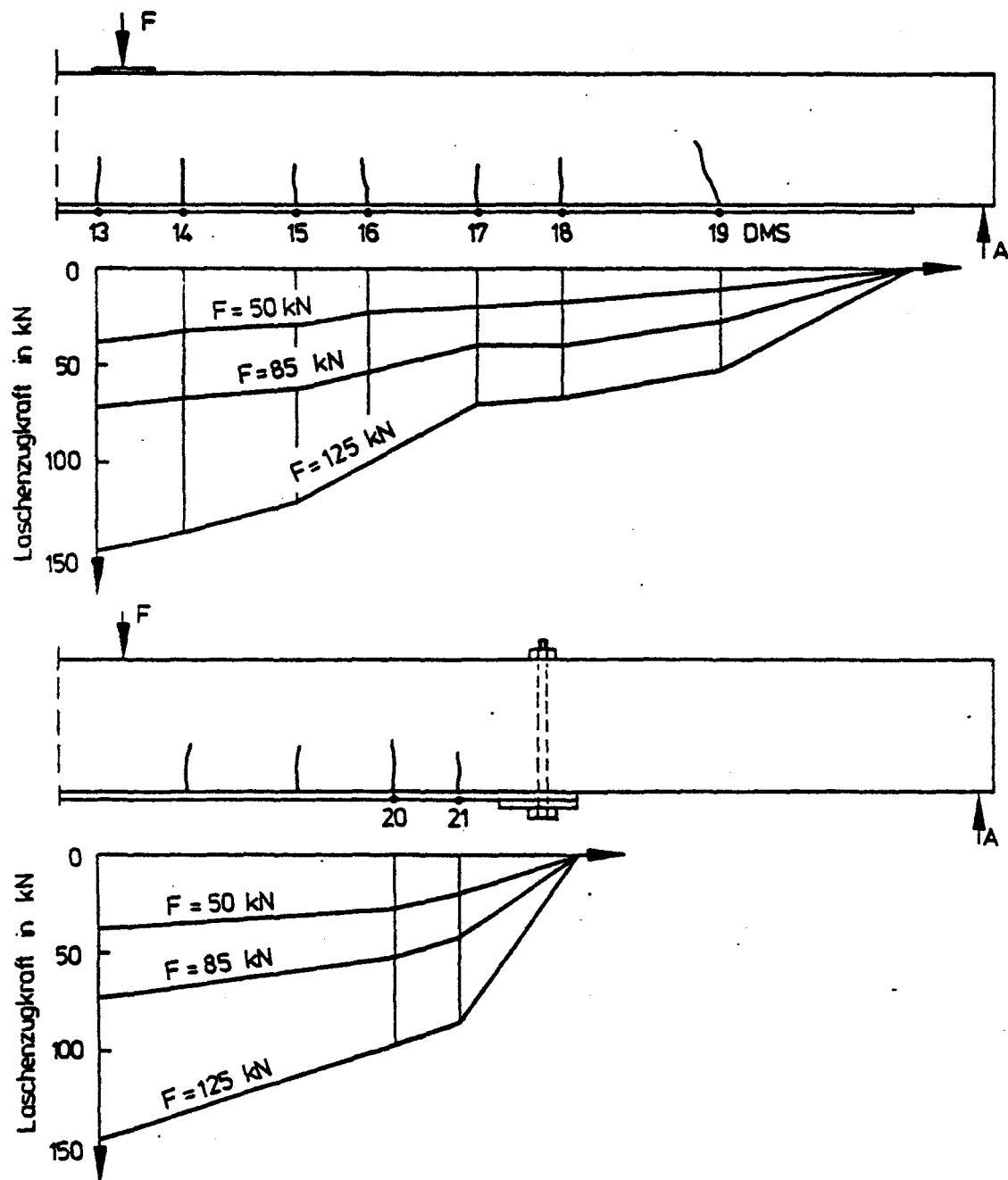


Bild 8.14.5: Maximale Endverschiebungen der Laschen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei Platte 10 und 10 S



Platte 4

Bild 8.15.1: Zugkraftlinien der Lasche bei Platte 4



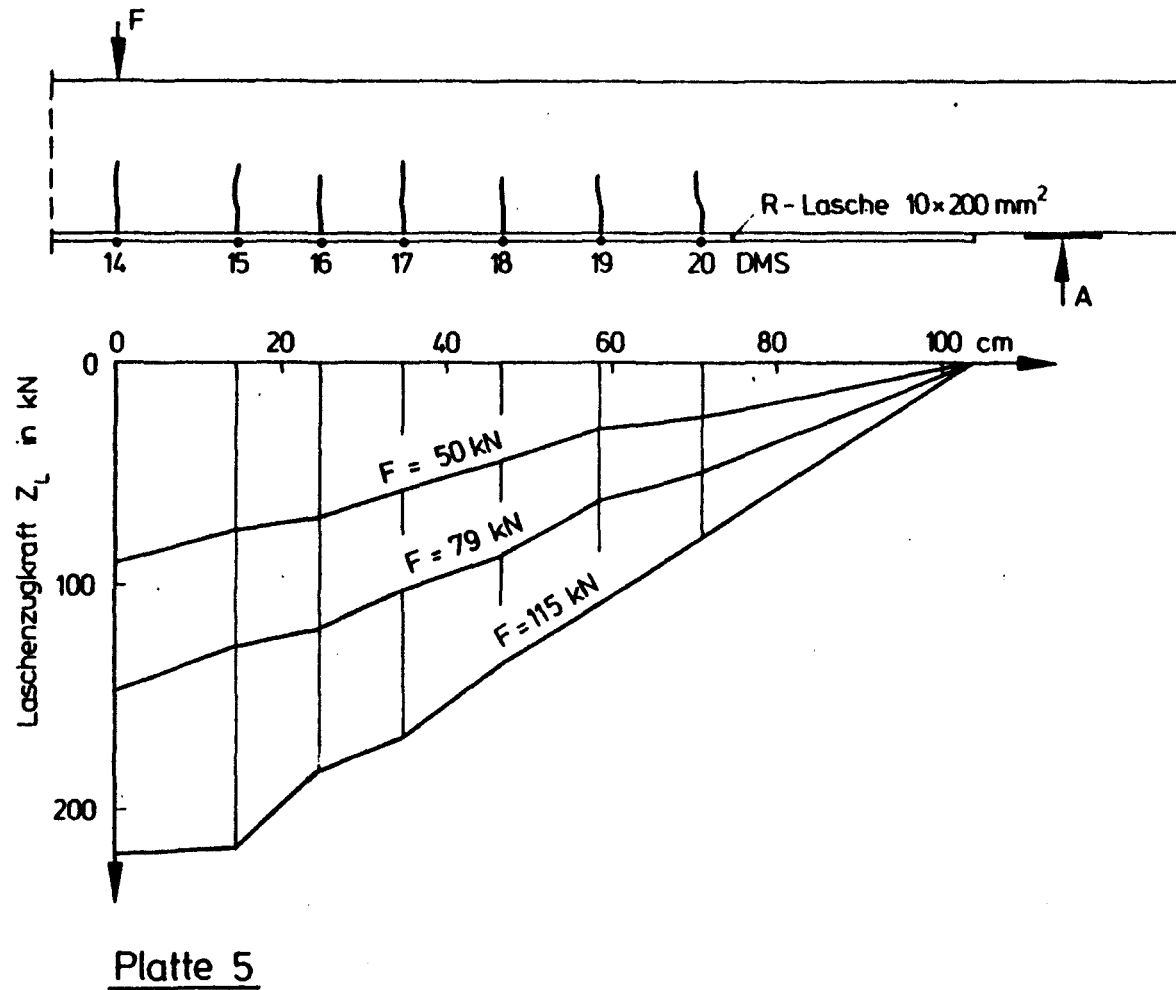


Bild 8.15.2: Zugkraftlinien der Lasche bei Platte 5

